



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-
126 empleado en una turbina eólica y
comprobación del coeficiente de potencia mediante
modelos analíticos y métodos numéricos**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Luis Manuel MENDOZA GOMERO

ASESOR

Miguel Angel ORMEÑO VALERIANO

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mendoza, L. (2018). *Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60- 126 empleado en una turbina eólica y comprobación del coeficiente de potencia mediante modelos analíticos y métodos numéricos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS MODALIDAD (M-1)

Siendo las 19:00 horas del jueves 15 de noviembre de 2018, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Mg. Ing. ELMER RAÚL VARGAS RONCAL y con la asistencia del asesor Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO, y miembros Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES y MSc. Ing. WILSON EMILIO ALVARADO TORRES de conformidad con la Resolución Rectoral N° 01934-R-02 que aprueba las diferentes modalidades de Titulación Profesional, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, del Bachiller:

LUIS MANUEL MENDOZA GOMERO

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invita al Bachiller LUIS MANUEL MENDOZA GOMERO a realizar la Exposición del Trabajo de Tesis titulada: "ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL PERFIL WORTMANN FX 60-126 EMPLEADO EN UNA TURBINA EÓLICA Y COMPROBACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA MEDIANTE MODELOS ANALÍTICOS Y MÉTODOS NUMÉRICOS".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:

..... DIECISIETE 17

El Presidente del Jurado Mg. Ing. ELMER RAÚL VARGAS RONCAL, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller LUIS MANUEL MENDOZA GOMERO, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 20:15 horas del mismo día, se levanta la sesión.


Mg. Ing. ELMER RAÚL VARGAS RONCAL
PRESIDENTE


Dr. Ing. MIGUEL ANGEL ORMEÑO VALERIANO
ASESOR


Dr. Ing. CÉSAR ALEJANDRO QUISPE GONZÁLES
MIEMBRO


MSc. Ing. WILSON EMILIO ALVARADO TORRES
MIEMBRO

Declaración de Autoría

Yo, Luis Manuel Mendoza Gomero, declaro que esta tesis titulada, "Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-126 empleado en una turbina eólica y comprobación del coeficiente de potencia mediante modelos analíticos y métodos numéricos" y el trabajo presentado en ella es de mi propiedad. Confirmando que:

- Este trabajo se realizó total o principalmente durante la candidatura para optar por el título profesional en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Cuando he consultado el trabajo publicado de otros, siempre se atribuye la propiedad de este trabajo claramente.
- Donde he citado el trabajo de otros, la fuente siempre se ha referenciado. Con la excepción de esas citas, esta tesis es enteramente mi propio trabajo.
- He reconocido todas las fuentes principales de ayuda.

Firma: _____



Fecha: _____

19/12/2018

Aquel que deja de ser mejor, deja de ser bueno.

Oliver Cromwell

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Resumen

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

Presentado por

BACH. LUIS MANUEL MENDOZA GOMERO

El presente trabajo de investigación consiste en el análisis aerodinámico de la turbina eólica *Waira 12*, proporcionada por la empresa *Waira Energía SAC*, y del perfil aerodinámico *Wortmann FX 60-126* empleado en la generación de la pala. Diversos estudios realizados a nivel nacional sobre turbinas eólicas han resultado en diferentes valores de potencia mediante modelos analíticos y métodos numéricos, es por ello que en esta investigación se describe en primera instancia el proceso de análisis de los coeficientes aerodinámicos del perfil Wortmann FX 60-126. Para ello hacemos usos de modelos analíticos-númericos (*XFOIL*) y herramientas computacionales (*Ansys-CFX*) para contrastar los coeficientes aerodinámicos obtenidos con los experimentales proporcionados por el Instituto de Aerodinámica y Gasdinámica de la Universidad de Stuttgart. Luego se genera y valida el código propio (*Python*) elaborado en base a la teoría de *BEM* (*Blade Element Momentum*) para el análisis de la turbina eólica. Posteriormente, haciendo uso de las fuentes aerodinámicas del perfil y de las condiciones de operación y geometría de la pala obtenemos la potencia y el empuje que genera el *Waira 12*. Una vez obtenidos los valores de potencia y empuje proveniente del modelo analítico-numérico, se procede a realizar el modelado del rotor de la turbina eólica y posterior a ello su simulación fluidodinámica computacional (*Ansys-CFX*), donde en última instancia se realiza la verificación y validación de los parámetros obtenidos mediante los métodos analíticos y numéricos.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres por el soporte incondicional que me brindan, a mi hermana por ser un ejemplo a seguir, a mis seres queridos, familiares y amigos que me dieron su apoyo y finalmente a quiénes siempre se encuentran cuidándonos.

Agradezco a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos y a sus docentes por el conocimiento y apoyo impartido tanto dentro como fuera de sus aulas.

Agradezco al Ing. Franco Canziani y a la empresa Waira Energía SAC por brindarme el material necesario para el presente estudio y permitirme iniciar mi carrera profesional conociendo la gran calidad humana y profesional de la empresa.

Agradezco al Ing. Miguel Ormeño por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así también por haberme guiado durante todo el proceso de desarrollo de la presente tesis.

Agradezco al Grupo de Investigación Asistida por Computadora (INACOM) por la asistencia y el apoyo con la herramienta Ansys CFD en el presente trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco a mis profesores, compañeros y a las personas que contribuyen en mi formación personal, académica y profesional, pues gracias a sus enseñanzas elaboré la presente tesis.

Índice general

Declaración de Autoría	I
Resumen	III
Agradecimientos	IV
Índice General	V
Índice de Figuras	VIII
Índice de Cuadros	XI
Abreviaciones	XIII
Símbolos	XIV
1. Introducción	1
1.1. Justificación	3
1.2. Antecedentes	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específico	4
1.3.3. Hipótesis	4
1.4. Alcance del estudio	5
2. Fundamentos teóricos	6
2.1. Fundamentos de aerodinámica	6
2.1.1. Propiedades aerodinámicas	6
2.1.2. Fuerzas y momento aerodinámicos	7
2.1.3. Coeficientes aerodinámicos	8
2.1.4. Centro de presión	10
2.1.5. Método de paneles	11
2.2. Fundamentos de turbinas eólicas	12
2.2.1. Recurso eólico	12

2.2.2.	Clasificación de turbinas eólicas	13
2.2.3.	Turbinas eólicas de eje horizontal	14
2.2.4.	Teoría del rotor ideal	15
2.2.5.	Teoría momento elemento de pala	17
2.3.	Fundamentos de dinámica de fluidos computacional	21
2.3.1.	Ecuaciones fundamentales	21
2.3.1.1.	Ley de conservación	21
2.3.1.2.	Ecuación de continuidad	22
2.3.1.3.	Ecuación de conservación del momento	22
2.3.2.	Diferencias finitas	23
2.3.2.1.	Error de Truncación (E.T.)	24
2.3.2.2.	Errores de discretización y redondeo	25
2.3.2.3.	Consistencia	25
2.3.2.4.	Estabilidad	26
2.3.2.5.	Convergencia	26
2.3.3.	Volúmenes finitos	26
2.3.4.	Modelos de turbulencia	28
3.	Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-126	31
3.1.	Descripción del perfil aerodinámico	31
3.2.	Coefficientes aerodinámicos	32
3.2.1.	Coefficientes experimentales	32
3.2.2.	Coefficientes Xfoil	39
3.2.3.	Coefficientes CFD	43
4.	Análisis aerodinámico de la turbina eólica	44
4.1.	Antecedentes de la turbina eólica	44
4.2.	Descripción de la turbina eólica	44
4.3.	Descripción del modelo de BEM	45
4.4.	Desarrollo del modelo de BEM	46
4.5.	Validación del modelo de BEM	47
4.5.1.	OPT HAWT NACA 4418	47
4.5.2.	OPT HAWT NACA 4412	49
5.	Simulación fluidodinámica del perfil Wortmann FX 60-126	51
5.1.	Generación del volumen de control	51
5.2.	Generación de la malla	52
5.3.	Condiciones de frontera	55
5.4.	Convergencia de la simulación	58
5.5.	Estudio de independencia de malla	60
6.	Simulación fluidodinámica de la turbina eólica Waira 12	63
6.1.	Generación de la turbina eólica	63
6.2.	Generación de los volúmenes de control	64
6.3.	Generación de las mallas	66
6.4.	Condiciones de frontera	67

6.5. Convergencia en la simulación	69
6.6. Estudio de independencia de malla	73
7. Análisis de los resultados	78
7.1. Resultados de los coeficientes aerodinámicos	78
7.2. Resultados de los parámetros de la turbina eólica	83
7.2.1. Resultados modelo de BEM	83
7.2.2. Resultados simulación computacional	86
7.3. Validación de los coeficientes aerodinámicos	92
7.4. Validación de los parámetros de la turbina eólica	97
8. Generación de la curva de potencia de la turbina eólica	102
8.1. Curva de potencia basado en el modelo de BEM	102
8.2. Curva de potencia basado en la simulación fluidodinámica	104
8.3. Comparación de las curvas de potencia	106
9. Conclusiones	108
10.Recomendaciones	110
Bibliografía	111
 Anexos	 113
A. Uso de software Ansys CFD	114
B. Procesamiento Profilkatalog I - Wortmann FX 60-126	116
C. Blade Element Momentum	119
D. Resultados HAWT OPT NACA 4418	126
E. Resultados HAWT OPT NACA 4412	128
F. Resultados HAWT Waira 12	130
G. Modelado del HAWT Waira 12	132

Índice de figuras

2.1. Distribución de presión y esfuerzo cortante	7
2.2. Fuerza y momento resultante en el cuerpo aerodinámico	7
2.3. Fuerza resultante y sus componentes	8
2.4. Centro de presión para un perfil	11
2.5. Distribución de vórtices sobre superficie del perfil	11
2.6. Turbina eólica Darrieus y Savonius	14
2.7. Turbinas eólicas - configuración de palas	14
2.8. Turbinas eólicas a barlovento y sotavento	15
2.9. Líneas de corriente atravesando el rotor	16
2.10. Coeficiente de potencia y empuje respecto al factor de inducción axial	17
2.11. Relación entre inducción tangencial respecto al factor de inducción axial	17
2.12. Volumen de control en N elementos anulares	18
2.13. Componentes de velocidad en sección de la turbina eólica	19
2.14. Dominio continuo - Dominio discreto	23
2.15. Malla estructurada centrada en la celda	27
2.16. Malla no-estructurada centrada en la celda	27
2.17. Malla estructurada vértice de la celda	27
2.18. Malla no-estructurada vértice de la celda	28
3.1. Perfil aerodinámico Wortmann FX 60-126	31
3.2. Data experimental Stuttgarter Profilkatalog I [25]	32
3.3. Data experimental C_l vs α	33
3.4. Data experimental C_d vs α	33
3.5. Data experimental C_m vs α	34
3.6. Data experimental E vs α	34
3.7. Xfoil C_l vs α	39
3.8. Xfoil C_d vs α	40
3.9. Xfoil C_m vs α	40
3.10. Xfoil E vs α	41
5.1. Dimensión del volumen de control del perfil aerodinámico	51
5.2. Volumen de control perfil aerodinámico	52
5.3. Volumen de control perfil aerodinámico	52
5.4. Estructuración de las mallas MP1,MP2 y MP3	53
5.5. Malla MP1 - Mallado estructurado	54
5.6. Malla MP1 - Detalle 1 malla alrededor del perfil aerodinámico	54

5.7. Malla MP1 - Detalle 2 malla alrededor del perfil aerodinámico . . .	55
5.8. Condiciones de frontera del perfil aerodinámico	57
5.9. Residuales de masa y momento	58
5.10. Residuales de los imbalances	59
5.11. Monitores: y_{prom} , c_d , c_l , c_m	59
5.12. Valores de y^+ con respecto a los elementos normalizados	60
5.13. Resultados del c_l respecto a los elementos normalizados	61
5.14. Resultados del c_d respecto a los elementos normalizados	62
5.15. Resultados del C_m respecto a los elementos normalizados	62
6.1. Estaciones de la pala de la turbina eólica	63
6.2. Vista trimétrica de la turbina eólica	64
6.3. Vista isométrica de la pala	64
6.4. Dimensión del volumen de control	65
6.5. Volúmenes de control	65
6.6. Mallado de los volúmenes de control	66
6.7. Condiciones de frontera dominio rotatorio	68
6.8. Condiciones de frontera dominio estacionario	69
6.9. Residuales de masa y momento	70
6.10. Residuales de energía cinética turbulenta y tasa de disipación es- pecífica	71
6.11. Imbalance del volumen rotatorio	71
6.12. Imbalance del volumen estacionario	72
6.13. Monitores: velocidad, empuje, potencia y presión.	72
6.14. Resultados del y^+ respecto a los elementos normalizados	73
6.15. Resultados de la potencia respecto a los elementos normalizados . .	74
6.16. Resultados del empuje respecto a los elementos normalizados . . .	74
6.17. Distribución de presión	75
6.18. Distribución de presión	76
6.19. Estacion E18 $r/R=0.8$	77
7.1. Resultados C_l vs α	78
7.2. Resultados C_d vs α	79
7.3. Resultados C_m vs α	79
7.4. Perfil Wortman FX 60-126 $Re = 1.5 \times 10^6$	80
7.5. Presión - $Re = 1.5 \times 10^6$	81
7.6. Esfuerzo cortante - $Re = 1.5 \times 10^6$	81
7.7. Resultados coeficiente de potencia	84
7.8. Resultados coeficiente de empuje	84
7.9. Valores del coeficiente de inducción axial - Estación 3	85
7.10. Resultados coeficientes de inducción axial y tangencial	85
7.11. Líneas de corriente de la turbina eólica - Vista Isométrica	86
7.12. Líneas de corriente de la turbina eólica - Vista Lateral	87
7.13. Distribución en la pala de la turbina eólica	87
7.14. Distribución de la presión en la pala	88
7.15. Distribución del esfuerzo cortante en la pala	88

7.16. Distribución del campo de presión	89
7.17. Distribución del campo de velocidad	89
7.18. Campo de presiones a lo largo de pala	90
7.19. Campo de velocidad a lo largo de la pala	91
7.20. Coeficientes de sustentación $Re = 2 \times 10^6$	92
7.21. Coeficientes de arrastre $Re = 2 \times 10^6$	93
7.22. Coeficientes de sustentación $Re = 1.5 \times 10^6$	93
7.23. Coeficientes de arrastre $Re = 1.5 \times 10^6$	94
7.24. Coeficientes de sustentación $Re = 1 \times 10^6$	94
7.25. Coeficientes de arrastre $Re = 1 \times 10^6$	95
7.26. Coeficientes de sustentación $Re = 7 \times 10^5$	95
7.27. Coeficientes de arrastre $Re = 7 \times 10^5$	96
7.28. Coeficientes de momento $Re = 7 \times 10^5$	96
7.29. Comparación de los coeficientes de potencia y empuje - BEM vs CFX	97
7.30. Gráfica comparativa de la fuerza normal- BEM vs CFX	99
7.31. Gráfica comparativa de la fuerza tangencial - BEM vs CFX	100
7.32. Torque en 1 pala	100
7.33. Empuje axial en 1 pala	101
8.1. Resultados BEM - Curva de potencia vs tip speed ratio	103
8.2. Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad rotacional	103
8.3. Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad del flujo libre	104
8.4. Resultados BEM - Curva de potencia vs tip speed ratio	105
8.5. Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad rotacional	105
8.6. Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad del flujo libre	106
8.7. Comparación de la curvas de potencia	106
8.8. Comparación de la curvas de potencia	107

Índice de cuadros

3.1. $Re = 7.0E05$ <i>Profilkatalog</i> (a)	35
3.2. $Re = 7.0E05$ <i>Profilkatalog</i> (b)	35
3.3. $Re = 1.0E06$ <i>Profilkatalog</i> (a)	36
3.4. $Re = 1.0E06$ <i>Profilkatalog</i> (b)	36
3.5. $Re = 1.5E06$ <i>Profilkatalog</i> (a)	37
3.6. $Re = 1.5E06$ <i>Profilkatalog</i> (b)	37
3.7. $Re = 2.0E06$ <i>Profilkatalog</i> (a)	38
3.8. $Re = 2.0E06$ <i>Profilkatalog</i> (b)	38
3.9. $Re = 7.0E05$ <i>XFoil</i>	42
3.10. $Re = 1.0E06$ <i>XFoil</i>	42
3.11. $Re = 1.5E06$ <i>XFoil</i>	43
3.12. $Re = 2.0E06$ <i>XFoil</i>	43
4.1. Parámetros de diseño Waira12	45
4.2. Descripción de la pala por estaciones	45
4.3. OPT HAWT NACA 4418	47
4.4. Parámetros geométricos OPT HAWT NACA 4418	48
4.5. Resultados experimentales OPT HAWT NACA 4418 [7]	48
4.6. OPT HAWT NACA 4418 Ncrit=1	48
4.7. HAWT NACA 4412	49
4.8. Parametros geometricos HAWT NACA 4412	49
4.9. Resultados codigo de BEM (Wood's Theory)	49
4.10. HAWT OPT Naca 4412 Ncrit=1	50
5.1. Parámetros de mallas MP1, MP2 y MP3	53
5.2. Condiciones de frontera del perfil aerodinámico	57
5.3. Resultados de las mallas MP1, MP2 y MP3	60
5.4. Resultados de las mallas MP1, MP2 y MP3	61
6.1. Parámetros del domino rotatorio de las mallas MT1, MT2 y MT3	66
6.2. Velocidad de rotación - TSR	67
6.3. Descripción del ordenador	68
6.4. Condiciones de frontera en el dominio estacionario	69
6.5. Resultados de las mallas MT1, MT2, MT3 y MT4	73
6.6. Error relativo entre las mallas MT1, MT2, MT3 y MT4	75
7.1. $Re = 7.0E05$ <i>CFX</i>	82
7.2. $Re = 1.0E06$ <i>CFX</i>	82

7.3. $Re = 1.5E06$ CFX	82
7.4. $Re = 2.0E06$ CFX	82
7.5. HAWT Waira 12 - Data exp. Profilkatalog I	83
7.6. HAWT Waira 12 - Data Xfoil Ncrit=1 (1.966 % turb level)	83
7.7. HAWT Waira 12 - CFX SST	83
7.8. Resultados Turbina Eólica - Malla MT1	86
7.9. Resultados BEM vs CFX	97
7.10. Resultados BEM - Fuerza normal y tangencial	98
7.11. Resultados CFX - Fuerza normal y tangencial	99
B.1. $Re = 7.0E05$ - C_l vs α	117
B.2. $Re = 7.0E05$ - C_l vs C_d	117
B.3. $Re = 1.0E06$ - C_l vs α	117
B.4. $Re = 1.0E06$ - C_l vs C_d	117
B.5. $Re = 1.5E06$ - C_l vs α	118
B.6. $Re = 1.5E06$ - C_l vs C_d	118
B.7. $Re = 2.0E06$ - C_l vs α	118
B.8. $Re = 2.0E06$ - C_l vs C_d	118
D.1. Resultados HAWT NACA 4418	126
D.2. Resultados HAWT NACA 4418	127
E.1. Resultados HAWT NACA 4412	128
E.2. Resultados HAWT NACA 4412	129
F.1. Resultados HAWT Waira 12 - BEM	130
F.2. Resultados HAWT Waira 12 - BEM	131

Abreviaciones

BEM	Blade E lement M omentum
CFD	Computational F luid D ynamic
EDP	Ecuación D iferencial P arcial
EDF	Ecuación D iferencial F inita
FINCyT	Fondo para la I nnovación, C iencia y T ecnología
IEC	International E lectrotechnical C omission
ITINTEC	Instituto de Investigación T ecnologica I ndustrial y de N ormas T ECnicas
MEM	Ministerior de E nergías y M inas
SEIN	Sistema de E léctrico I nterconectado N acional

Símbolos

L	fuerza de sustentación	N
L'	fuerza de sustentación por unidad de longitud	N/m
D	fuerza de arrastre	N
D'	fuerza de arrastre por unidad de longitud	N/m
p	presión	N/m ²
R	fuerza resultante	N
M	momento resultante	Nm
M'	momento resultante por unidad de longitud	N
V_∞	velocidad flujo libre	m/s
N	fuerza normal	N
A	fuerza axial	N
c	cuerda	m
T	temperatura	K
	empuje	N
P	potencia	W (Js ⁻¹)
P_d	potencia disponible	W
a	factor de inducción axial	
a'	factor de inducción tangencial	
p_∞	presión dinámica	N/m ²
C_L	coeficiente de sustentación	
C_l	coeficiente de sustentación por unidad de longitud	
C_D	coeficiente de arrastre	
C_d	coeficiente de arrastre por unidad de longitud	
C_M	coeficiente de momento	
C_m	coeficiente de momento por unidad de longitud	

m	masa	kg/m ³
E	eficiencia aerodinámica	
E_c	energía cinética	J
C_P	coeficiente de potencia	
C_T	coeficiente de empuje	
r	radio del rotor	m
V_0	velocidad aguas arriba del rotor	m/s
V_{rel}	velocidad relativa al rotor	m/s
P'_N	componente normal por unidad de longitud	N/m
P'_T	componente tangencial por unidad de longitud	N/m
C_n	coeficiente normal por unidad de longitud	
C_t	coeficiente tangencial por unidad de longitud	
B	número de palas	
V	volumen	
α	ángulo de ataque	° o rad
β	ángulo de torsión	° o rad
ϕ	ángulo de flujo	° o rad
ρ	densidad	kg/m ³
ω	velocidad rotacional	rads ⁻¹
σ	factor de solidez	
τ	esfuerzo cortante	N/m ²
θ	local pitch	° o rad
θ_p	ángulo de instalación	° o rad

En memoria de mis seres queridos y amigos...

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad las energías renovables son una alternativa real para cubrir la demanda energética que va en aumento y en reducir las emisiones de gases contaminantes que agravan el problema del cambio climático. Estas energías, frente a las fuentes tradicionales que producen emisiones de contaminantes, como el carbón o gas, tienen características que actualmente las hacen viables y competitivas debido al decremento de sus costos de producción durante los últimos años. Estas energías que abundan en la naturaleza son inagotables, pues se encuentran permanentemente disponibles; son limpias, debido a que producen energía sin emisión de gases; y reducen la dependencia energética, pues minimizan el consumo de fuentes de energía convencionales. Entre estas energías renovables tenemos la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz.

En el 2016, las turbinas eólicas convencionales tuvieron una capacidad instalada total de 54 GW, entre los 90 países donde se encuentran instaladas, donde lidera China seguido por Estados Unidos, Alemania, La India y Brasil¹.

En nuestro país, desde mediados de los años ochenta, se realizaron las primeras instalaciones de turbinas eólicas. En Villa El Salvador se instaló una turbina prototipo de 500 W a cargo de ITINTEC, posterior a ello, ELECTROPERU gestionó las centrales eólicas de Yasila y Toran con turbinas eólicas con capacidad de 3.5, 4 y 12 kW. En los años noventa se instalaron dos turbinas eólicas, una en Malabrigo de 250 kW y otra en Marcona de 450kW, siendo las de mayor potencia hasta la fecha [29].

Según el Ministerio de Energía y Minas (MEM), la capacidad instalada de los parques eólicos hasta finales del 2016 fue de 239 MW que representa aproximadamente el 1 % del potencial eólico del Perú, siendo su capacidad total de 28 395 MW. En

¹Global Wind Report 2016

el norte del país contamos con los parques eólicos de Cupisnique (La Libertad) y Talara (Piura), con capacidades instaladas de 80 MW y 30 MW respectivamente, que entraron en operación en el 2014. En el mismo año entró en operación, en la costa central, el parque de Marcona (Ica) de 32 MW de potencia instalada. Dos años después se integraría al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) el parque eólico Tres Hermanas (Ica) que posee una capacidad de 97 MW y cuenta con un total de 33 turbinas eólicas.

En el 2016 la generación de energía eléctrica a nivel nacional fue de 48 326.4 GWh, de la cual 2 373.4 GWh provino de recursos energéticos renovables (RER), representando el 4.91 % del total. Dentro de ella, la energía eólica representó el 2.18 % del total generado, que equivale a 1054.1 GWh [30].

Por otra parte, en zonas rurales del Perú donde no llega el tendido eléctrico, las fuentes renovables son una alternativa para la mejora de la calidad de vida de las familias. En este escenario la energía eólica a pequeña escala permite implementar sistemas de bombeo, así como generar energía eléctrica en conjunto con sistemas solares fotovoltaicos y bancos de baterías, consolidando las denominadas micro-redes de energía eléctrica. Estas micro-redes no solo permiten mejorar la calidad de vida de las familias, sino que resultan ventajosas para empresas ubicadas en zonas rurales que desean disminuir sus costos de producción energética al implementar el uso de energías renovables y minimizar el consumo de combustible.

A causa de las bondades que representa el uso de las turbinas eólicas como fuente de producción de energía, el presente trabajo busca profundizar en el estudio del rotor de la turbina eólica en vistas a incentivar futuras investigaciones y promover la inversión en el campo de la energía eólica.

En el Capítulo 1 se expondrán las generalidades de la tesis, su justificación y antecedentes, los elementos de estudio, los objetivos que se cumplirán a lo largo del trabajo y el alcance de la misma.

En el Capítulo 2 describiremos los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión de los conceptos de aerodinámica, turbinas eólicas y de la dinámica de fluidos computacional necesarios para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En los Capítulos 3 y 5 se aborda el estudio del perfil aerodinámico Wortmann FX 60-126 seleccionado en el presente trabajo, describiendo sus características geométricas y sus coeficientes aerodinámicos experimentales. Posteriormente, este perfil es sometido a las herramientas numéricas Xfoil y Ansys-CFX para obtener sus coeficientes aerodinámicos numéricos.

Los Capítulos 4 y 6 se centran en la descripción de la turbina eólica Waira 12, presentando la geometría de construcción de su rotor y describiendo el análisis

efectuado en base al modelo de Blade Element Momentum (BEM) elaborado mediante el lenguaje de programación Python. Posterior a ello, se realiza la simulación computacional mediante el software Ansys-CFX para obtener el coeficiente de potencia y empuje de la turbina eólica.

En el Capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos en los capítulos previos. Además, se realiza la validación de los coeficientes aerodinámicos comparando los resultados numéricos con los experimentales. De manera análoga, se validan los resultados de la turbina eólica para los valores de potencia y empuje obtenidos mediante el modelo de BEM y la simulación computacional.

El Capítulo 8 es una síntesis de la curva de potencia de la turbina eólica a diferentes valores de velocidad que se presenta como producto final del estudio realizado. Finalizamos con los Capítulos 9 y 10 donde se brindan las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo de investigación.

1.1. Justificación

Las turbinas eólicas a pequeña escala son una fuente de energía renovable que han ido en aumento en nuestro país durante los últimos años. Estudios realizados acerca de las turbinas eólicas mediante herramientas computacionales han resultado en diferentes valores de potencia en contraste con modelos analíticos. Esta investigación analiza la importancia del perfil aerodinámico empleado en la generación de potencia de una turbina eólica de pequeña escala. La utilidad de esta investigación radica en la profundización de los coeficientes aerodinámicos del perfil seleccionado, esto con la finalidad de obtener resultados suficientemente confiables para validar el coeficiente de potencia obtenido de la turbina eólica mediante el uso de diferentes modelos analíticos y métodos numéricos.

1.2. Antecedentes

La turbina eólica seleccionada en este estudio, denominada *Waira 12*, pertenece a la empresa Waira Energía SAC. Esta turbina es parte del proyecto **217 FINCYT – FIDECOM PIPEA 201** y el lugar de ubicación del proyecto es en la localidad de Huarmey, zona costera a la altura del km 250 de la panamericana norte. El diseño de la turbina eólica fue elaborado por la misma empresa y el perfil aerodinámico seleccionado fue el perfil Wortmann FX 60-126.

Esta turbina es la de mayor dimensión fabricada a nivel nacional, contando con un diámetro de 12 m y una altura de eje aproximadamente de 15 m. La potencia nominal del *Waira 12* es de 25 kW a condiciones de diseño de 10.5 m/s y 120 RPM.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-126 empleado en una turbina eólica de eje horizontal tripala y comprobar el coeficiente de potencia de la turbina eólica mediante modelos analíticos y métodos numéricos.

1.3.2. Objetivos específico

- Analizar el perfil Wortmann FX 60-126 mediante el empleo del software XFOIL y ANSYS CFX y validar los coeficientes aerodinámicos obtenidos.
- Desarrollar y validar el código en base a la teoría Momento Elemento de Pala(BEM).
- Obtener los coeficientes de potencia de la turbina eólica mediante el método de BEM usando los coeficientes aerodinámicos validados.
- Realizar la simulación fluidodinámica de la turbina eólica con el software ANSYS CFX.
- Analizar y validar los coeficientes de potencia generados al simular la turbina eólica.
- Generar y comparar la curva característica de la turbina eólica basado en los resultados obtenidos.

1.3.3. Hipótesis

Los resultados obtenidos por medio de los modelos analíticos y de las simulaciones fluidodinámicas del perfil aerodinámico y de la turbina eólica, se encuentran relacionados entre sí de manera suficientemente confiable para ser comprobadas.

1.4. Alcance del estudio

El alcance del presente trabajo de investigación es la obtención de la curva de potencia para la turbina eólica seleccionada en base al análisis del perfil aerodinámico empleado y al de la turbina eólica. Para ello haremos usos de modelos analíticos y métodos numéricos.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Fundamentos de aerodinámica

El estudio de la dinámica de fluidos lo clasificaremos en hidrodinámica, aerodinámica y la dinámica de gases. En el presente estudio nos concentraremos en la aerodinámica externa, la cual predice las fuerzas, momentos y la transferencia de calor sobre cuerpos en movimientos a través de un fluido, que usualmente es aire según indica Anderson [27].

Los objetos de análisis en este trabajo son la turbina eólica y el perfil aerodinámico, siendo el perfil un cuerpo geométrico tal que al fluir el aire alrededor de él genera una fuerza resultante la cual podemos descomponer en sustentación (fuerza perpendicular al flujo) y resistencia, también conocido como arrastre (fuerza en dirección del flujo).

2.1.1. Propiedades aerodinámicas

Se mencionan las propiedades aerodinámicas principales para el estudio del presente trabajo de investigación:

- Presión: fuerza normal por unidad de área ejercida en una superficie.
- Densidad: masa por unidad de volumen.
- Temperatura: propiedad directamente proporcional a la energía cinética promedio de las moléculas de aire.
- Velocidad del flujo: propiedad vectorial, tiene magnitud y dirección, puede variar de un punto a otro.

- Línea de corriente: es el trayecto de un elemento de fluido en su recorrido cuando el flujo es estacionario.
- Esfuerzo cortante: es la relación entre la fuerza de fricción de una línea de corriente respecto a otra por unidad de área, donde el área de interés es perpendicular a la línea de corriente.
- Coeficiente de viscosidad: es la constante proporcional de la relación entre el esfuerzo cortante y la gradiente de velocidad.

$$\tau = \mu \, dV/dy$$

Cabe resaltar que la viscosidad dinámica es función de la temperatura del fluido, donde para nuestro estudio la temperatura se considera constante, por tanto no hay cambio en las propiedades del fluido.

2.1.2. Fuerzas y momento aerodinámicos

El origen de la fuerza resultante y el momento aerodinámico de cualquier cuerpo geométrico está basado en la distribución de la presión y del esfuerzo cortante sobre el cuerpo geométrico en estudio como indica Anderson [27], tal como se muestra en la Figura 2.1.



FIGURA 2.1: Distribución de presión y esfuerzo cortante

Al integrar estas distribuciones de presión y esfuerzo cortante a lo largo de la superficie del cuerpo aerodinámico obtenemos la fuerza resultante R y el momento M , como se muestra en la Figura 2.2

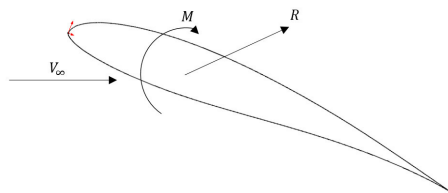


FIGURA 2.2: Fuerza y momento resultante en el cuerpo aerodinámico

Al descomponer la fuerza resultante R , como ya mencionamos al inicio de la Sección 2.1, obtenemos la fuerza de sustentación perpendicular al flujo (L) y la fuerza de resistencia (arrastre) en el sentido del flujo (D), Figura 2.3.

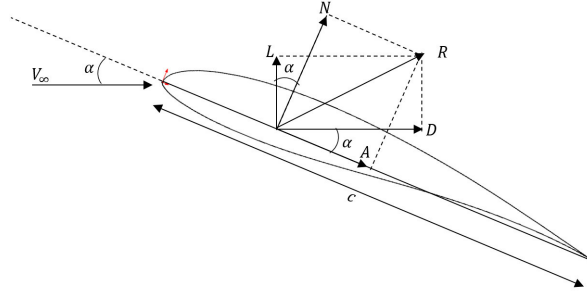


FIGURA 2.3: Fuerza resultante y sus componentes

R : fuerza resultante c : cuerda
 L : sustentación D : resistencia(arrastre)
 α : ángulo de ataque V_∞ : velocidad del flujo libre
 N : fuerza normal A : fuerza axial
 M : momento

Podemos representar la fuerza y el momento resultante en función a los componentes de fuerza axial y normal a la cuerda del perfil aerodinámico de la siguiente manera:

$$L = N \cos(\alpha) - A \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

$$D = N \sin(\alpha) + A \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

$$M = xN \quad (2.3)$$

2.1.3. Coeficientes aerodinámicos

Los coeficientes aerodinámicos son el resultado adimensional de expresar la dependencia de las fuerzas aerodinámicas en función de variables independientes como la velocidad del flujo (V_∞), la densidad (ρ_∞) y viscosidad (μ) del fluido, la compresibilidad del fluido (velocidad del sonido (a_∞)) y la geometría del cuerpo, el cual puede ser una longitud representativa de interés. Definimos la cuerda c como la longitud de referencia.

Presentando la fuerza resultante R en función de las variables descritas anteriormente, obtenemos:

$$R = f(\rho_\infty, V_\infty, c, \mu, a_\infty) \quad (2.4)$$

Haciendo uso de la teoría del análisis dimensional y eligiendo de forma arbitraria la densidad, velocidad del flujo y longitud de la cuerda como las variables físicas representativas, se obtiene que los productos adimensionales son:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{R}{\rho_\infty V_\infty^2 c^2} \\ \Pi_2 &= \frac{\rho_\infty V_\infty c}{\mu} \\ \Pi_3 &= \frac{V_\infty}{a_\infty} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde se define Π_2 como el *Número de Reynolds* y Π_3 como el *Número de Mach*.

Al producto adimensional Π_1 podemos multiplicarlo por un valor numérico y seguirá siendo adimensional. Así también, c^2 representa un área debido a su dimensión de longitud al cuadrado, por tanto podemos reemplazarlo por un área de referencia S , donde obtenemos:

$$\Pi_1 = \frac{R}{\rho_\infty V_\infty^2 S} \quad (2.6)$$

Definiendo la presión dinámica como $q_\infty = \frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2$, obtenemos que el producto adimensional Π_1 como coeficiente de la fuerza resultante es:

$$C_R = \frac{R}{q_\infty S} \quad (2.7)$$

Debido a que las fuerzas de sustentación, resistencia (arrastre), normal y axial son componentes de la fuerza resultante podemos expresarla de forma análoga como:

$$\begin{aligned} C_L &= \frac{L}{q_\infty S} & C_D &= \frac{D}{q_\infty S} \\ C_N &= \frac{N}{q_\infty S} & C_A &= \frac{A}{q_\infty S} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Análogamente, debido a que el momento también se puede expresar como la ecuación (2.4), obtenemos que el coeficiente de momento se puede expresar como:

$$C_M = \frac{M}{q_\infty S c} \quad (2.9)$$

Mencionamos que para problemas donde se involucre transferencia de calor es necesario incorporar variables independientes como la temperatura, calor específico, entre otros, al análisis adimensional donde obtendríamos productos adimensionales adicionales.

Así también se enfatiza que en los 3 productos adimensionales mostrados, existe la reducción de las variables independientes principales de un total de 5 a una dependencia de 2 números adimensionales los cuales son Re y Ma , donde podemos representar el coeficiente de la fuerza resultante en función de estas dos.

$$C_R = f(Re, Ma) \quad (2.10)$$

Los subíndices escritos en mayúscula describen los coeficientes aerodinámicos para un cuerpo tridimensional. Mientras que para un cuerpo bidimensional los subíndices son escritos con letra minúscula y el área representativa se convierte en una longitud representativa, donde obtenemos:

$$C_l = \frac{L'}{q_\infty c} \quad C_d = \frac{D'}{q_\infty c} \quad C_m = \frac{M'}{q_\infty c^2} \quad (2.11)$$

Adicionalmente, dos cantidades adimensionales son el coeficiente de presión (C_{pr}) y el coeficiente de fricción (C_f), definidos de la siguiente manera:

$$C_{pr} = \frac{p - p_\infty}{q_\infty c} \quad C_f = \frac{\tau}{q_\infty c} \quad (2.12)$$

Donde p_∞ es la presión aguas arriba no perturbada.

2.1.4. Centro de presión

El momento aerodinámico descrito en la ecuación (2.3) permite calcular el centro de presión al despejar la distancia situada desde el borde de ataque, tal que:

$$M' = -(x_{cp})N' \quad (2.13)$$

$$x_{cp} = \frac{-M'}{N'} \quad (2.14)$$

En términos de la sustentación (L) y el arrastre (D) obtenemos:

$$x_{cp} = \frac{-M'}{(\cos(\theta)L' + \sin(\theta)D')} \quad (2.15)$$

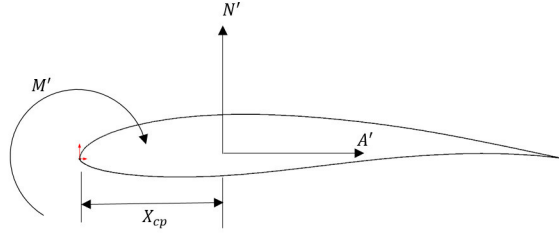


FIGURA 2.4: Centro de presión para un perfil

Donde para valores menores del ángulo de ataque tal que $\sin(\theta) \approx 0$ y $\cos(\theta) \approx 1$ obtenemos:

$$x_{cp} = \frac{-M'}{L'} \quad (2.16)$$

Concluimos que el momento aerodinámico en $c/4$ es:

$$M'_{c/4} = M' + \frac{c}{4}L' \quad (2.17)$$

2.1.5. Método de paneles

Según Cebeci et al [28] el método de paneles es ideal para calcular el flujo alrededor de un perfil en movimiento en un fluido no viscoso e incompresible, donde el objetivo del método es obtener una solución de las intensidades de las fuentes o vórtices tal que la superficie del cuerpo se convierta en una línea de corriente del flujo.

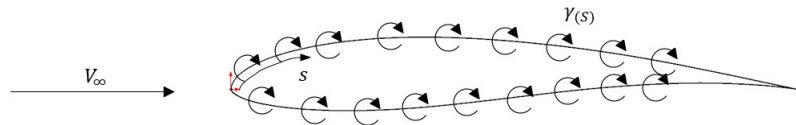


FIGURA 2.5: Distribución de vórtices sobre superficie del perfil

Anderson [25] indica que al ser resueltos los valores de los vórtices, estos permiten obtener la distribución de velocidad en la superficie del cuerpo, la circulación total debida a los paneles y la sustentación por unidad de longitud.

2.2. Fundamentos de turbinas eólicas

El recurso eólico ha sido usado desde tiempos antiguos de diferentes formas, como por ejemplo el uso del viento para propulsar veleros, que posteriormente cambió con la creación de las máquinas de combustión interna y a vapor. Asu vez ha sido usado en molinos para moler grano o para bombear agua para irrigaciones y en el caso de los Países Bajos para evitar que el océano inunde terrenos de bajos niveles.

A comienzos del siglo XX se dio inicio al uso de la electricidad y los molinos de viento se convirtieron gradualmente en turbinas eólicas mediante la conexión del rotor a un generador eléctrico. Uno de los primeros estudios aerodinámicos sobre turbinas eólicas se realizó en Dinamarca, donde el rotor fue instalado en uno de los primeros túneles de viento en el mundo. Sin embargo, la producción de electricidad fue tomada por los grupos electrógenos y turbinas a vapor y solo durante las guerras mundiales la energía eólica se retomó nuevamente debido a que el suministro de combustible escaseó.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la investigación de las turbinas eólicas continuó en diversos países. Una vez más en Dinamarca, se construyó el famoso *GedserTurbine*, turbina a barlovento tripala con rotor regulado y conectado a un generador asíncrono AC con velocidad constante.

Debido a la crisis de 1973, las turbinas eólicas se volvieron interesantes de nuevo para muchos países que querían tener menos dependencia de los combustibles importados. Muchos programas de investigación se iniciaron a causa de esto y gradualmente los primeros prototipos se volvieron comerciales, tornándose importante para la industria a partir de los años 90.

2.2.1. Recurso eólico

En la generación de potencia de una turbina eólica, el recurso eólico es la energía cinética disponible que presenta el viento al interactuar con el rotor de la turbina, el cual la convierte en energía mecánica y en última instancia en energía eléctrica.

Representamos la turbina eólica como un disco circular donde su área es $A = \pi R^2$, donde R es el radio del disco o rotor. El siguiente análisis descrito por Hansen [2] determina la energía cinética que pasa por el rotor por unidad de tiempo.

Se considera un elemento de fluido que está cruzando el rotor y este elemento tiene un área de ΔA y una distancia normal al rotor de δx . Obteniendo que la masa de este elemento es:

$$m = \rho \Delta A \delta x \quad (2.18)$$

y su energía cinética es:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \Delta A \delta x V_o^2 \quad (2.19)$$

El tiempo necesario para que el elemento cruce el rotor es δt , donde $\delta x = V_o \delta t$.

La energía total durante el tiempo δt en todo el rotor es:

$$\delta(E_c) = \frac{1}{2} \rho A V_o^3 \delta t \quad (2.20)$$

Llevando al límite la Ecuación (2.20) donde $\delta t \rightarrow 0$, obtenemos finalmente que la potencia disponible del viento es:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{dE_c}{dt} = P_d = \frac{1}{2} \rho A V_o^3 \quad (2.21)$$

Se hace mención la dependencia de la potencia con el cubo de la velocidad del viento y el cuadrado del radio del rotor.

Debido a que no es posible obtener la potencia teórica máxima P_d , ya que representaría que toda la energía cinética del viento se extrajera y la velocidad final fuera cero, existe un coeficiente de potencia C_P definido como la razón de la potencia actual obtenida entre la potencia máxima disponible del viento.

$$C_P = \frac{P}{P_d} \quad (2.22)$$

Este límite teórico de extracción de potencia es conocido como *Limite de Betz*, cuyo valor es $C_{P \text{ máx}} = \frac{16}{27} = 0.593$.

2.2.2. Clasificación de turbinas eólicas

Las turbinas eólicas se clasifican según la posición de su eje de rotación. Las de eje vertical se denominan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) y las de eje horizontal, *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT).

Los dos tipos de turbinas eólicas de eje vertical más conocidos son los modelos *Darrieus* y *Savonius*. Estos modelos son muy poco usados debido a su limitada generación de electricidad, ya que tienen un bajo rendimiento y no pueden girar a altas velocidades.



FIGURA 2.6: Turbina eólica Darrieus y Savonius

Las turbinas de eje horizontal son las más usadas debido a su mayor rendimiento en la extracción de energía proveniente del viento y se clasifican según su cantidad de palas, posición del rotor, tamaño y potencia.

2.2.3. Turbinas eólicas de eje horizontal

La configuración óptima de una turbina eólica es de 3 palas ya que así se alcanza el mejor rendimiento sin presentar inconvenientes como la descompensación de fuerzas que se experimenta en un rotor monopala o bipala. Cabe mencionar que también existe la configuración multipala, cuya principal aplicación es en la extracción o bombeo de agua.

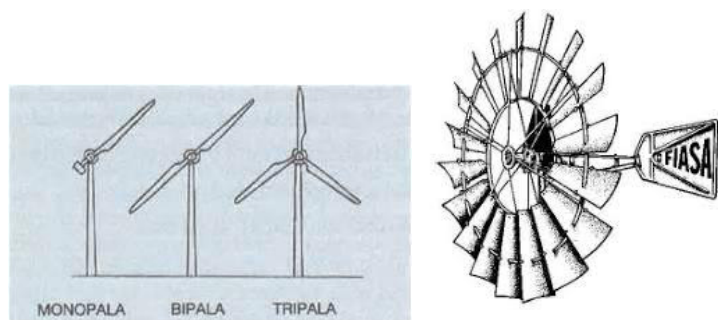


FIGURA 2.7: Turbinas eólicas - configuración de palas

Se denominan turbinas eólicas a barlovento o sotavento dependiendo de la incidencia del viento sobre la posición del rotor. La posición convencional es la de

barlovento, donde la incidencia del viento es en la parte anterior al rotor. La literatura describe que su fabricación es más sencilla y barata, y sus esfuerzos son más compensados y homogéneos. La configuración a sotavento es cuando el rotor es posicionado aguas abajo, es decir posterior a la torre.

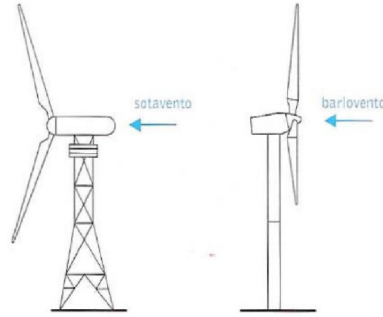


FIGURA 2.8: Turbinas eólicas a barlovento y sotavento

Finalmente, el diámetro del rotor o la longitud de la pala es el parámetro principal en la clasificación de turbinas eólicas ya que proporciona la magnitud de potencia de la máquina.

Para nuestro estudio, según la *International Electrotechnical Commission (IEC)*, el estándar para turbinas eólicas de pequeña escala se aplica cuando el área del rotor es menor a 200 m^2 o la potencia generada es menor a 50 kW .

2.2.4. Teoría del rotor ideal

En la teoría del rotor ideal se hace uso del modelo unidimensional donde se considera al rotor como un disco ideal, el cual no contempla esfuerzo de fricción y no hay componente de velocidad rotacional. Esta teoría genera el factor de inducción axial a , el cual cuantifica la extracción de energía cinética en el plano del rotor.

$$u = (1 - a)V_0 \quad (2.23)$$

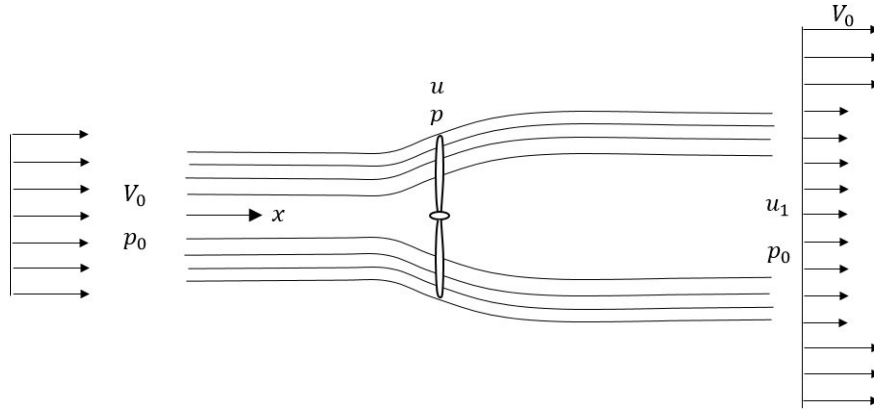


FIGURA 2.9: Líneas de corriente atravesando el rotor

Según Hansen [2] y Wood [8], los valores de la potencia y empuje están en relación al área del rotor, velocidad del flujo, densidad del aire y al factor de inducción axial, tal que:

$$P = 2\rho V_0^3 a(1-a)^2 A \quad (2.24)$$

$$T = 2\rho V_0^2 a(1-a) A \quad (2.25)$$

Hacemos uso del coeficiente de potencia definiéndolo formalmente como la potencia en el eje (P) entre la potencia disponible del viento P_d :

$$C_P = \frac{P}{P_d} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_0^3} = 4a(1-a)^2 \quad (2.26)$$

Y definimos el coeficiente de empuje como:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V_0^2} = 4a(1-a) \quad (2.27)$$

Diferenciando la Ecuación (2.26) con respecto al factor de inducción axial a obtenemos que el coeficiente de potencia máximo es $C_{P_{max}} = 16/27$ cuando $a = 1/3$.

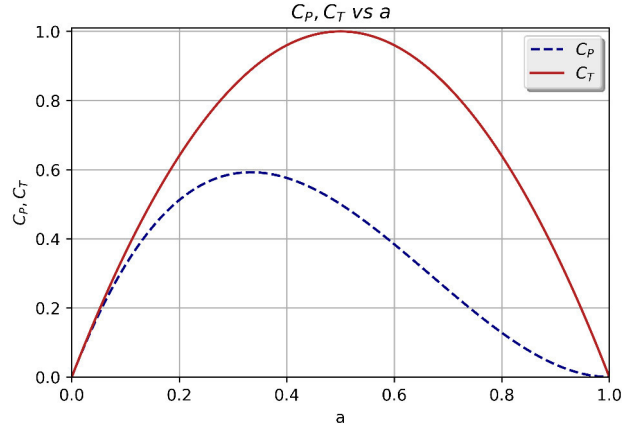


FIGURA 2.10: Coeficiente de potencia y empuje respecto al factor de inducción axial

Se define el factor de inducción tangencial a' cuando se considera el componente de velocidad rotacional en el rotor y este se relaciona con el factor de inducción axial a mediante la Ecuación 2.28.

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (2.28)$$

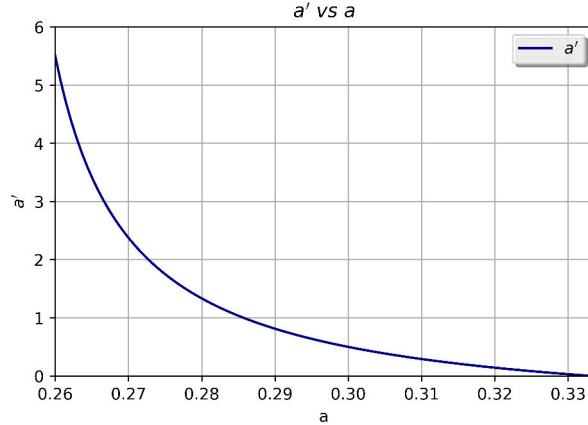


FIGURA 2.11: Relación entre inducción tangencial respecto al factor de inducción axial

2.2.5. Teoría momento elemento de pala

La teoría del *Blade Element Momentum (BEM)*, traducida como teoría del momento elemento de pala, descrita por Manxwell [13], Hansen [2] y Wood [8] permite calcular las cargas estacionarias generadas en la pala y por tanto el empuje y potencia para diferentes velocidades del viento, velocidades rotacionales, ángulos variables y tamaños del rotor.

En la teoría unidimensional del rotor ideal la geometría del rotor no es considerada a diferencia del modelo de BEM donde sí se considera el número de palas, la longitud de la cuerda, la torsión y el perfil seleccionado.

La teoría de BEM acopla los fundamentos del rotor ideal con la generación de fuerzas situada en cada sección de análisis de la pala. Para ello, el rotor se discretiza en N elementos anulares con una altura dr como se muestra en la Figura 2.12.

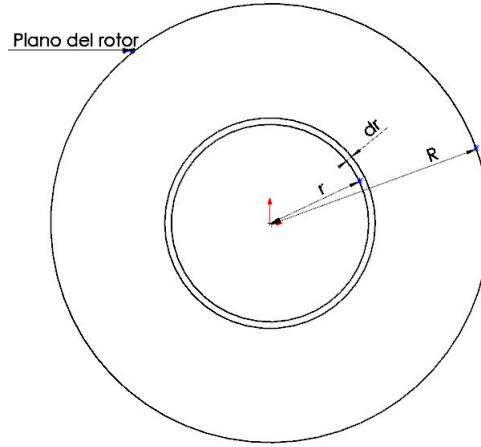


FIGURA 2.12: Volumen de control en N elementos anulares

Para los elementos anulares se asume que no hay dependencia radial, es decir no hay interacción de un elemento con respecto a otro. Además, las fuerzas que se generan en la pala son constantes en cada elemento anular.

La potencia y el empuje generado en la sección anular en términos de los coeficientes axial y tangencial son:

$$dP = 4\pi r^3 \rho V_0 \omega^2 (1 - a) a' dr \quad (2.29)$$

$$dT = 4\pi r \rho V_0^2 a (1 - a) dr \quad (2.30)$$

Hacemos mención que la V_{rel} que actúa sobre la sección de la pala es una composición entre la velocidad axial $(1 - a)V_0$ y la tangencial $(1 + a')\omega r$ en el plano del rotor como se aprecia en la Figura 2.13.

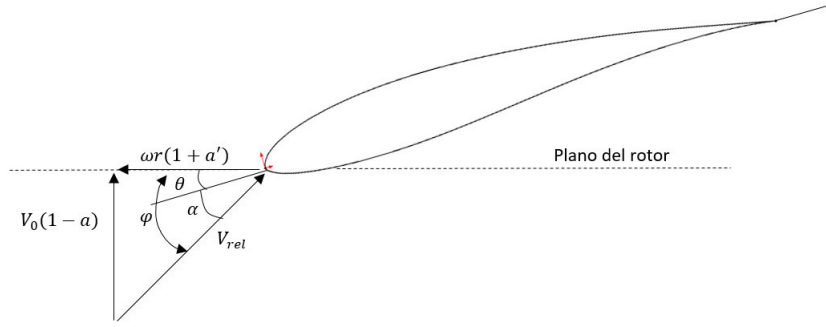


FIGURA 2.13: Componentes de velocidad en sección de la turbina eólica

El ángulo θ denominado local pitch es la combinación del ángulo de instalación θ_p y de la torsión de la pala β .

El ángulo de ataque local α está definido por la diferencia entre el ángulo de flujo ϕ y el local pitch θ :

$$\alpha = \phi - \theta \quad (2.31)$$

Adicionalmente, obtenemos de la Figura 2.13 el ángulo de flujo ϕ y las relaciones geométricas:

$$\phi = \arctan\left(\frac{(1-a)V_0}{(1+a')\omega r}\right) \quad (2.32)$$

$$V_{rel} \sin \phi = V_0(1-a) \quad (2.33)$$

$$V_{rel} \cos \phi = \omega r(1+a') \quad (2.34)$$

Posteriormente, de la obtención de los coeficientes aerodinámicos descritos en la sección 2.1.3 expresamos la sustentación (L') y el arrastre (D') como:

$$L' = C_l \left(\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \right) \quad (2.35)$$

$$D' = C_d \left(\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \right) \quad (2.36)$$

Descomponiendo las fuerzas de sustentación y arrastre en componentes normal y tangencial al plano del rotor obtenemos:

$$P'_N = L' \cos \phi + D' \sin \phi \quad (2.37)$$

$$P'_T = L' \sin \phi - D' \cos \phi \quad (2.38)$$

Normalizando las Ecuaciones (2.37) y (2.38) con respecto a $1/2\rho V_{rel}^2 c$, obtenemos los coeficientes normal y tangencial:

$$C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (2.39)$$

$$C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (2.40)$$

donde:

$$P'_N = C_n \left(\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \right) \quad (2.41)$$

$$P'_T = C_t \left(\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c \right) \quad (2.42)$$

Definimos el factor de solidez σ como la fracción del área anular en el rotor cubierto por las palas:

$$\sigma = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (2.43)$$

donde:

$$\begin{aligned} B : & \text{Número de palas} \quad c(r) : \text{Cuerda local} \\ r : & \text{Posición radial} \end{aligned}$$

Expresando los diferenciales del empuje y torque en términos de las fuerzas normal y tangencial obtenemos:

$$dT = B P'_N dr \quad (2.44)$$

$$dM = r B P'_T dr \quad (2.45)$$

Usando las Ecuaciones (2.39) y (2.40) en conjunto con (2.33) y (2.34), reemplazándolas en (2.44) y (2.45):

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin \phi} c C_n dr \quad (2.46)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_0 (1-a) \omega r (1+a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_t r dr \quad (2.47)$$

Si igualamos las Ecuaciones (2.46) y (2.30), obtenemos una expresión para el factor de inducción axial:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} - 1} \quad (2.48)$$

Análogamente, al igualar las Ecuaciones (2.47) y (2.29), el factor de inducción tangencial es:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (2.49)$$

2.3. Fundamentos de dinámica de fluidos computacional

2.3.1. Ecuaciones fundamentales

2.3.1.1. Ley de conservación

Tal como se menciona Hirsch [6], la ley de conservación es el concepto fundamental detrás de las ecuaciones de la mecánica de fluidos y significa que la variación de una cantidad conservativa intensiva ϕ del flujo dentro de un volumen dado se debe al efecto neto de fuentes internas y de la cantidad que está cruzando la superficie limitante. Esta cantidad se llama flujo y su expresión resulta de las propiedades mecánicas y termodinámicas del fluido. Los flujos y las fuentes dependen en general de las coordenadas espacio-tiempo, así como del movimiento del fluido. Los flujos asociados son vectores para una cantidad escalar y tensores para una cantidad vectorial como el momento. Se menciona que no todas las cantidades de flujo obedecen a la ley de conservación y la identificación de las cantidades que sí obedecen a ella se definen mediante el estudio de las propiedades físicas de un sistema de flujo de fluidos.

Las tres cantidades definidas por la ley de conservación que describen la dinámica de fluidos son la masa, el momento y la energía. Esto representa en total cinco ecuaciones: la ecuación de continuidad; la de momento, que tiene tres componentes en el espacio; y la de energía.

Por otra parte, es esencial tener presente que otras cantidades tales como la presión, temperatura y entropía, no satisfacen la ley de la conservación. Esto no significa que no podamos escribir una ecuación para estas cantidades, sino que estas no cumplirían la ley de conservación.

Forma integral y diferencial

Consideremos que la cantidad ϕ sea una propiedad escalar por unidad de volumen y definimos el volumen arbitrario V delimitado por la superficie S , donde la forma integral de la ley de conservación es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi \, dV + \oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = \int_V Q_V \, dV + \oint_S \vec{Q}_S \cdot d\vec{S} \quad (2.50)$$

donde:

$$\begin{aligned} \phi &: \text{Propiedad escalar} & F &: \text{Flujo que atraviesa } S \\ Q_V &: \text{Fuente de volumen} & Q_S &: \text{Fuente de superficie} \end{aligned}$$

Usando el teorema de Gauss podemos reescribir la Ecuación (2.50) en:

$$\int_V \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{F} dV = \int_V Q_V dV + \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_S dV \quad (2.51)$$

Obteniendo finalmente la forma diferencial de la ley de conservación:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{F} = Q_V + \vec{\nabla} \cdot \vec{Q}_S \quad (2.52)$$

2.3.1.2. Ecuación de continuidad

La ley de conservación de masa específica indica que en un sistema la masa del fluido no puede desaparecer ni crearse. La cantidad ϕ es, en este caso, la masa específica, $\phi = \rho$ en kg/m^3 .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.53)$$

Y en forma diferencial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (2.54)$$

2.3.1.3. Ecuación de conservación del momento

El momento es una cantidad vectorial definida como el producto de masa y velocidad, que se expresa por unidad de volumen en el producto de densidad y velocidad, es decir que $\vec{\phi} = \rho \vec{v}$ y el flujo que atraviesa la superficie del volumen de control es $\vec{\bar{F}} = \rho \vec{v} \vec{v}$. La ecuación de conservación de momento es

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \rho \vec{f}_e \quad (2.55)$$

donde:

$$\begin{aligned} \vec{\bar{\tau}} &: \text{Tensor de esfuerzo} \\ p &: \text{Presión estática} \\ f_e &: \text{Fuerzas externas} \end{aligned}$$

El tensor de esfuerzo de Reynolds es:

$$\bar{\tau} = \tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \right] \quad (2.56)$$

2.3.2. Diferencias finitas

Las diferencias finitas son una representación de un dominio continuo de un problema al reemplazarlo por un dominio discreto de elementos. Pletcher [20] describe que se reemplaza el dominio continuo de la Figura 2.14 $u(x, y)$ por $u(i\Delta x, j\Delta y)$ y generalmente los nodos suelen ubicarse en base a la posición de los subíndices i y j ; por tanto, los nodos restantes se escriben en base al nodo (i, j) .

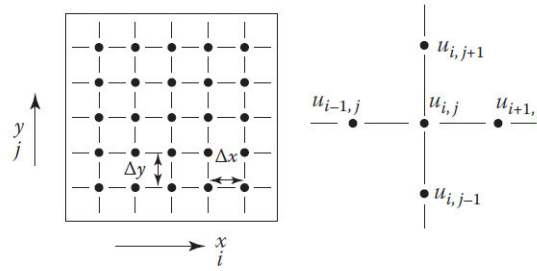


FIGURA 2.14: Dominio continuo - Dominio discreto

Podemos escribir los nodos alrededor de (i, j) partiendo de $u_{i,j}$ como $u(x_0, y_0)$, tal que:

$$u_{i+1,j} = u(x_0 + \Delta x, y_0) \quad (2.57)$$

$$u_{i-1,j} = u(x_0 - \Delta x, y_0) \quad (2.58)$$

$$u_{i,j+1} = u(x_0, y_0 + \Delta y) \quad (2.59)$$

$$u_{i,j-1} = u(x_0, y_0 - \Delta y) \quad (2.60)$$

Los subíndices indican variación espacial mientras que los superíndices indican la variación temporal como $u_{i,j}^{n+1}$.

Para la definición de la diferencia finita para una derivada podemos partir de la definición de la derivada para una función $u(x, y)$ en $x = x_0$ y $y = y_0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x_0 + \Delta x, y_0) - u(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (2.61)$$

Haciendo uso de la serie de Taylor para $u(x_0 + \Delta x, y_0)$, obtenemos:

$$\begin{aligned} u(x_0 + \Delta x, y_0) = & u(x_0, y_0) + \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_0 \Delta x + \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_0 \frac{\Delta x^2}{2!} + \\ & + \left. \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right|_0 \frac{\Delta x^3}{3!} + \cdots + \left. \frac{\partial^n u}{\partial x^n} \right|_0 \frac{\Delta x^n}{n!} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Ordenando la Ecuación (2.62) para obtener la diferencia adelantada:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_0 = & \frac{u(x_0 + \Delta x, y_0) - u(x_0, y_0)}{\Delta x} - \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_0 \frac{\Delta x}{2!} \\ & - \left. \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right|_0 \frac{\Delta x^2}{3!} - \cdots - \left. \frac{\partial^n u}{\partial x^n} \right|_0 \frac{\Delta x^{n-1}}{n!} \end{aligned} \quad (2.63)$$

Reescribiendo la Ecuación (2.63) en notación i, j tenemos:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + E.T. \quad (2.64)$$

donde $u_{i+1,j} - u_{i,j}/\Delta x$ es la diferencia finita que representa a la derivada $\partial u/\partial x|_{i,j}$.

2.3.2.1. Error de Truncación (E.T.)

La diferencia entre la derivada parcial y su diferencia finita es el error de truncación (E.T.), donde al usar la notación O para caracterizar el orden del E.T., podemos expresar la Ecuación (2.64) de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (2.65)$$

donde:

$$\begin{aligned} |E.T.| \leq K|\Delta x| \quad \text{cuando} \quad \Delta x \rightarrow 0 \\ K > 0 \end{aligned}$$

Otra manera de conceptualizar el error de truncación es al representar una EDP en ecuaciones de diferencias finitas, donde el error de truncación es la diferencia entre la EDP y la EDF, tal como se muestra de la Ecuación de calor 2.66 y en su representación en diferencias finitas 2.67.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned}
\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}_{EDP} &= \underbrace{\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} - \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)}_{EDF} \\
&\quad + \underbrace{\left[-\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right]_{n,i} \frac{\Delta t}{2} + \alpha \left[\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \right]_{n,i} \frac{(\Delta x)^2}{12} + \dots}_{E.T.}
\end{aligned} \tag{2.67}$$

2.3.2.2. Errores de discretización y redondeo

Cualquier solución calculada, incluyendo valores numéricos calculados a partir de una solución analítica exacta de una EDP, puede verse afectada por el redondeo a un número finito de dígitos en las operaciones aritméticas.

Estos errores se llaman errores de redondeo y se debe estar consciente de su existencia al obtener una solución de la EDF debido al gran número de operaciones dependientes y repetitivas que suelen estar involucradas. En algunos tipos de cálculos, la magnitud del error de redondeo es proporcional al número de nodos del mallado en el dominio del problema. En estos casos, el refinado de la malla puede disminuir el E.T. pero aumentar el error de redondeo.

El error de discretización es el error en la solución de la EDP causado por la sustitución del dominio continuo por uno discreto y se define como la diferencia entre la solución exacta de la EDP y la solución exacta de la EDF.

En términos de las definiciones descritas hasta el momento, la diferencia entre la solución exacta de la EDP y la solución computacional de la EDF sería igual a la suma del error de discretización y el error de redondeo asociado con el cálculo de diferencias finitas. También podemos observar que el error de discretización es el error en la solución que es causado por el E.T. en la representación de diferencias de la EDP más cualquier error introducido por las condiciones de frontera.

2.3.2.3. Consistencia

La consistencia trata acerca de la medida en que la EDF se aproxima a la EDP. La diferencia entre la EDP y la aproximación de las diferencias finitas ya ha sido definida como el E.T. Se dice que una representación de diferencias finitas de una EDP es consistente si podemos demostrar que la diferencia entre la EDP y su representación diferencial desaparece a medida que la malla es refinada, es decir:

$$\lim_{mesh \rightarrow 0} (EDP - EDF) = \lim_{mesh \rightarrow 0} (E.T.) = 0$$

2.3.2.4. Estabilidad

La estabilidad numérica es un concepto aplicable en sentido estricto sólo a problemas no permanentes. Un esquema numérico estable es aquel para el cual no se permite que los errores de cualquier fuente (redondeo, truncamiento) crezcan en la secuencia de procedimientos numéricos a medida que el cálculo avanza de un paso temporal al siguiente. Generalmente, la preocupación por la estabilidad ocupa mucho más de nuestro tiempo y energía que la preocupación por la consistencia. La consistencia es relativamente fácil de comprobar y la mayoría de los esquemas que se conciben serán consistentes sólo debido a la metodología empleada en su desarrollo. Por contraparte, la estabilidad es mucho más sutil y por lo general se requiere mayor análisis para establecer analíticamente que un esquema sea estable.

2.3.2.5. Convergencia

Generalmente, encontramos que un esquema consistente y estable es convergente. La convergencia aquí significa que la solución a la EDF se aproxima a la solución verdadera de la EDP que tiene las mismas condiciones iniciales y de frontera cuando la malla es refinada.

2.3.3. Volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos consiste en la discretización de la forma integral de la ley de conservación a diferencia del método de diferencias finitas que discretiza la forma diferencial de la ley de conservación.

Para establecer el método de volúmenes finitos se discretiza el espacio realizando una subdivisión en volúmenes que son asociados a puntos de control. Luego se aplica la ley integral de conservación a dichos volúmenes descrita por Moukalled [\[22\]](#).

Debido a su generalidad, el método de volúmenes finitos puede manejar cualquier tipo de discretización o mallado, los cuales pueden ser del tipo estructurado o no-estructurado, como se muestran en las Figuras [2.15](#) y [2.16](#). La diferencia principal entre estas mallas es que la estructurada sigue un orden de identificación de celdas o nodos como en la Figura [2.15](#) a diferencia del orden aleatorio de generación de celdas descrito en la Figura [2.16](#).

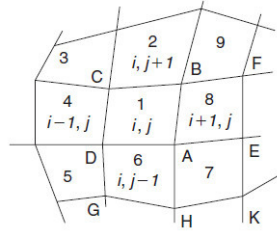


FIGURA 2.15: Malla estructurada centrada en la celda

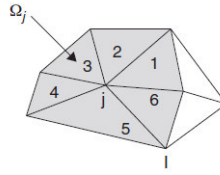


FIGURA 2.16: Malla no-estructurada centrada en la celda

Un enfoque adicional aparece a través de la forma en que relacionamos los volúmenes de control con el mallado. Esto tiene un impacto en la posición de los puntos en los que se definirán los valores de la función.

Un primer enfoque es el *centrado en la celda*, donde las incógnitas están en los centros de las celdas de la malla y las líneas del mallado definen los volúmenes y superficies finitos. Una elección obvia para los volúmenes de control es efectivamente hacerlos coincidir con las celdas de la malla. Aquí las variables están asociadas con una celda, como en las Figuras 2.15 y 2.16. Las variables de flujo son valores promediados sobre la celda y pueden ser consideradas como representativas de algún punto dentro de la celda, por ejemplo el punto central de la celda.

El segundo enfoque es el de *vértices de la celda*, donde las incógnitas se definen en las esquinas de la malla. Aquí las variables se unen a los puntos de la malla, es decir, a los vértices de la celda, como se muestra en la Figura 2.17 y 2.18. Existe una mayor flexibilidad para la definición de los volúmenes de control en este enfoque.

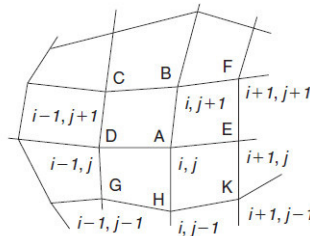


FIGURA 2.17: Malla estructurada vértice de la celda

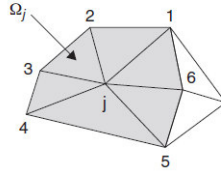


FIGURA 2.18: Malla no-estructurada vértice de la celda

Para que el método de volúmenes finitos sea consistente debe satisfacer que la suma de los volúmenes finitos deba cubrir todo el dominio y estos subdominios tienen permitido superponerse con la condición de que cada parte del volumen superpuesto aparezca como parte de un número par de subdominios diferentes de tal manera que la ley integral de conservación se cumpla para cualquier combinación de subdominios adyacentes.

Una vez discretizado el dominio, la ecuación integral de conservación es aplicada a cada volumen de control V_J , asociado a un punto de control J , donde obtenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_J} \phi dV + \oint_{S_J} \vec{F} \cdot d\vec{S} = \int_{V_J} Q dV \quad (2.68)$$

La Ecuación (2.68) se sustituye por su forma discreta, donde las integrales de volumen se expresan como los valores promediados sobre la celda y donde la integral de superficie se sustituye por una suma sobre todas las caras delimitadoras del volumen considerado:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_J V_J) + \sum_{\text{caras}} \vec{F} \cdot \Delta \vec{S} = Q_J V_J \quad (2.69)$$

2.3.4. Modelos de turbulencia

En este apartado describiremos brevemente los conceptos fundamentales de los modelos de turbulencia relevantes para este trabajo de investigación. Se hace la invitación al lector a revisar a Pletcher[20] y Moukalled[22] como fuentes principales y a Wilcox [21] para mayor información.

Actualmente el enfoque más popular para abordar los problemas de flujo turbulento a nivel industrial, es el que se basa en la resolución de las ecuaciones de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), donde el promedio estadístico está en función de la descomposición de las variables de flujo en un componente de valor medio temporal y uno fluctuante.

Las variables a descomponer son la velocidad y la presión:

$$\begin{aligned}\nu &= \bar{\nu} + \nu' \\ p &= \bar{p} + p' \\ \bar{\nu} &= \bar{u}\hat{i} + \bar{v}\hat{j} + \bar{w}\hat{k} \\ \nu' &= u'\hat{i} + v'\hat{j} + w'\hat{k}\end{aligned}\tag{2.70}$$

Donde se reemplazan en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento y se introducen finalmente seis nuevas incógnitas, $-\rho\overline{\nu'\nu'}$, conocidas como el tensor de Reynolds τ^R :

$$\tau^R = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix}\tag{2.71}$$

El modelado directo del tensor de Reynolds se basa en la hipótesis de Boussinesq:

$$\tau^R = -\rho\overline{\nu'\nu'} = \mu_t\{\vec{\nabla}\nu + (\vec{\nabla}\nu)^T\} - \frac{2}{3}[\rho k + \mu_t(\vec{\nabla} \cdot \nu)]\bar{I}\tag{2.72}$$

$$k = \frac{1}{2}\overline{\nu' \cdot \nu'}\tag{2.73}$$

donde:

k : *energía cinética turbulenta*

μ_t : *viscosidad turbulenta*

Los modelos de turbulencia basados en la hipótesis de Boussinesq buscan expresar la viscosidad turbulenta en términos de k y de la longitud de escala l tal que:

$$\mu_t = \rho l \sqrt[2]{k}\tag{2.74}$$

Estos modelos se agrupan formando categorías y estos pueden ser de cero ecuaciones, una ecuación, dos ecuaciones y finalmente los modelos de cierre de segundo orden. Los más populares en los procesos industriales son los modelos de dos ecuaciones, ya que requieren la solución de dos variables en las ecuaciones de transporte obteniendo resultados más precisos.

El modelo $k - \epsilon$ de Jones y Launder, donde ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, fue uno de los primeros modelos de ecuación y es el más popular. Sin embargo, es un modelo de turbulencia de número de Reynolds alto, válido solo para flujos donde el esfuerzo cortante no pueda ser integrado en la superficie del sólido.

El modelo $k - \omega$ de Wilcox es un modelo cercano al modelo $k - \epsilon$, para lo cual ϵ es reemplazado por una ecuación para ω , donde ω es la velocidad a la cual la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica interna por unidad de volumen y tiempo y es capaz de predecir mejor los flujos separados. El principal inconveniente del modelo de Wilcox es su sensibilidad a los valores específicos de corriente libre, lo que conduce a una fuerte dependencia de la solución sobre el valor arbitrario especificado de la corriente libre ω . Esta dependencia no está presente en el modelo $k - \epsilon$.

El modelo *Baseline*, (*BSL*) $k - \omega$ desarrollado por Menter combina los modelos $k - \epsilon$ y $k - \omega$ para aprovechar su respectivas ventajas, es decir, la robustez del $k - \omega$ cerca de las superficies de las paredes debido a su simple formulación de número de Reynolds y su capacidad para calcular con precisión los flujos con gradientes de presión adversos débiles y el mejor rendimiento del modelo $k - \epsilon$ cerca del borde de la capa límite y lejos de las paredes debido a su insensibilidad a los valores de corriente libre.

Finalmente, el modelo *Shear, Stress, Transport*, $k - \omega$, *SST*, que es en base al modelo *Baseline*, (*BSL*) $k - \omega$ y comparado con otros modelos de turbulencia tiene un rendimiento mejorado del gradiente de presión adversa. La primera modificación está relacionada con la asunción de Bradshaw, que establece que el esfuerzo de corte principal y la energía cinética turbulenta en la capa límite están linealmente relacionadas. Este modelo mantiene la robustez frente a las superficies de las paredes y su insensibilidad a los valores de corriente libre lejos de la superficie.

Capítulo 3

Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-126

3.1. Descripción del perfil aerodinámico

El perfil aerodinámico seleccionado en el diseño de la turbina eólica es el *FX 60 – 126*, diseñado en el año 1960 (60) y pertenece a la familia de perfiles elaborados por el Dr. Franz Xavier Wortmann.

Este perfil cuenta con un espesor máximo de $12.6\%c$ (126) al $27.9\%c$ y una curvatura máxima de $3.6\%c$ al $56.5\%c$ donde c es la cuerda del perfil aerodinámico.

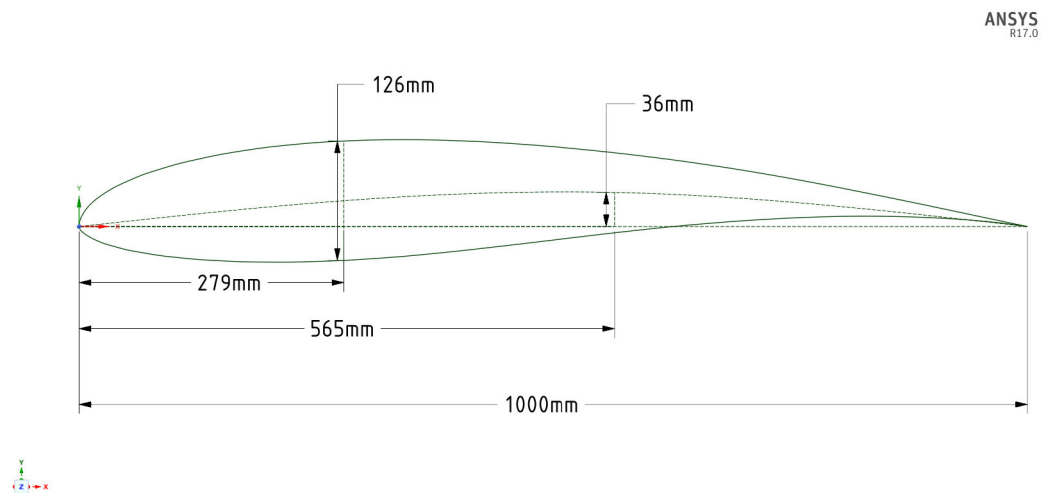


FIGURA 3.1: Perfil aerodinámico Wortmann FX 60-126

3.2. Coeficientes aerodinámicos

3.2.1. Coeficientes experimentales

Los coeficientes aerodinámicos fueron obtenidos del *Stuttgarter Profilkataloge I* [25], desarrollado por el Instituto de Aerodinámica y Gas-dinámica de la Universidad de Stuttgart.

Las pruebas sobre el perfil Wortmann FX 60-126 se realizaron en el túnel de viento denominado "Laminar Wind Tunnel" (LWK) en condiciones de bajo nivel de turbulencia tal como se describe en el Profilkataloge [25].

En los mecanismos de instrumentación empleados se describe el uso de transductores de presión distribuidos en las paredes del túnel de viento y en la salida del mismo. Adicionalmente, se empleó una balanza externa para la medición de la fuerza de sustentación, de resistencia y del momento aerodinámico. La selección del ángulo de ataque fue controlada por un motor eléctrico.

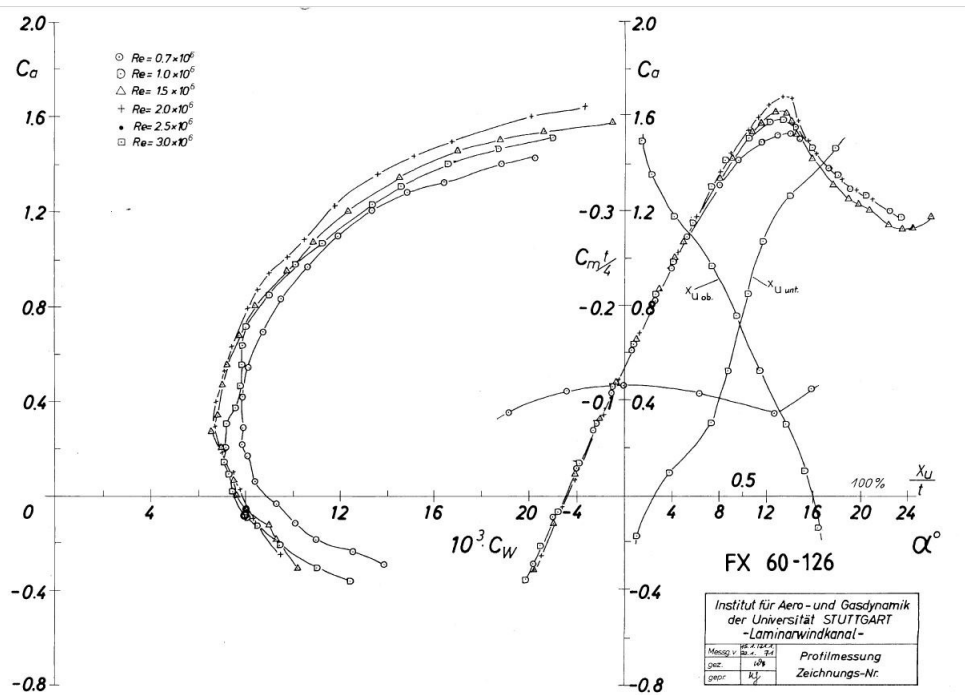
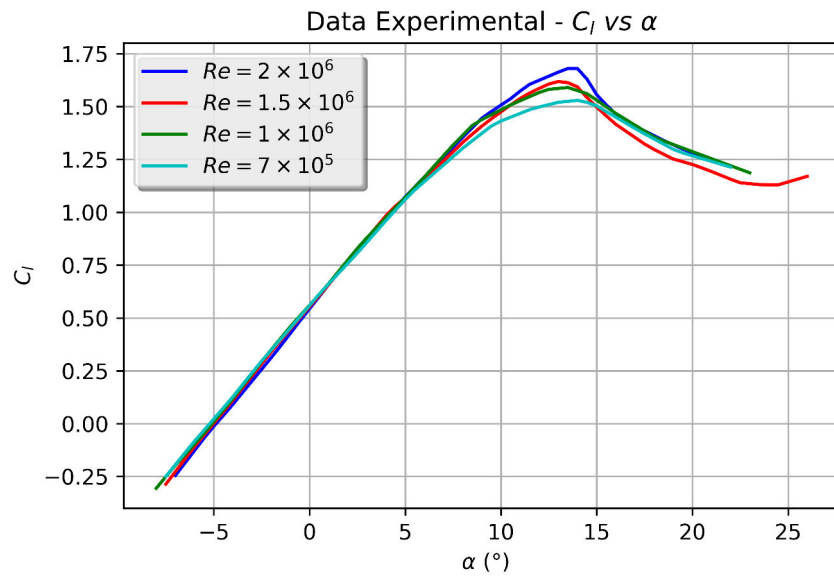
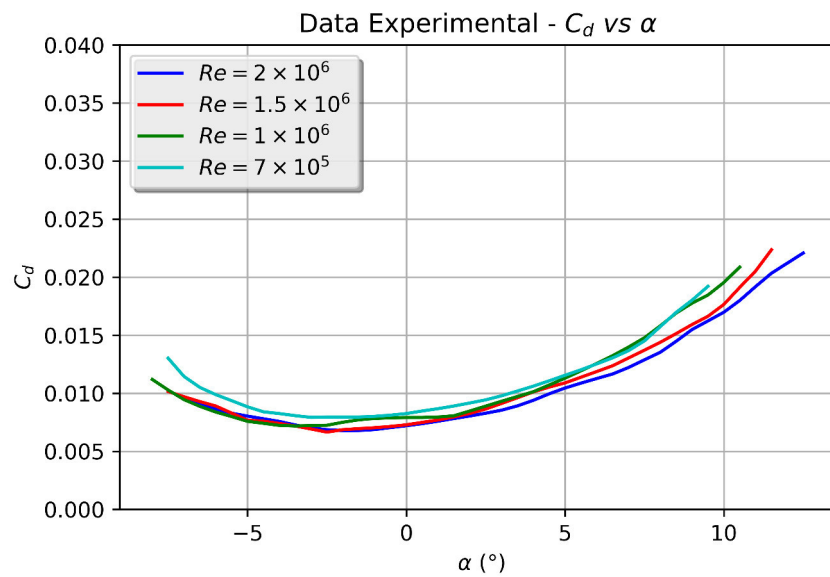


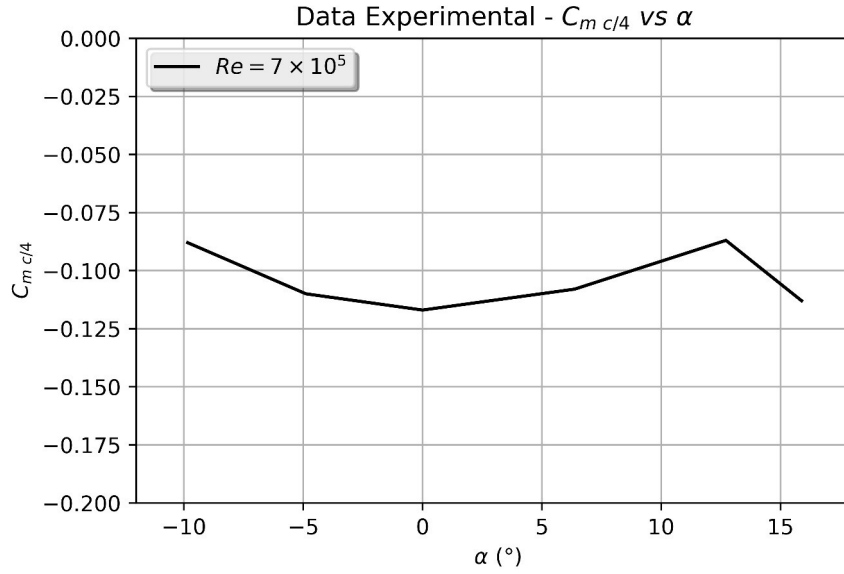
FIGURA 3.2: Data experimental Stuttgarter Profilkatalog I [25]

Tanto las fuerzas como presiones fueron procesadas mediante las descargas eléctricas en la salida de los transductores. A estas señales procesadas se les aplicó factores correctivos del túnel de viento y finalmente se obtuvieron las curvas aerodinámicas. En la Figura 3.2 se presentan los resultados experimentales provenientes del Stuttgarter Profilkatalog I.

Posteriormente, se procedió a obtener los valores de los coeficientes aerodinámicos mostrados en la Figura 3.2. Para ello se elaboró un script o código, el cual permite indentificar mediante un sistema de coordenadas las posiciones de los puntos pertenecientes a las curvas aerodinámicas. Una vez extraídos estos puntos, se procesaron estos resultados para normalizar los coeficientes de sustentación y arrastre en base al ángulo de ataque.

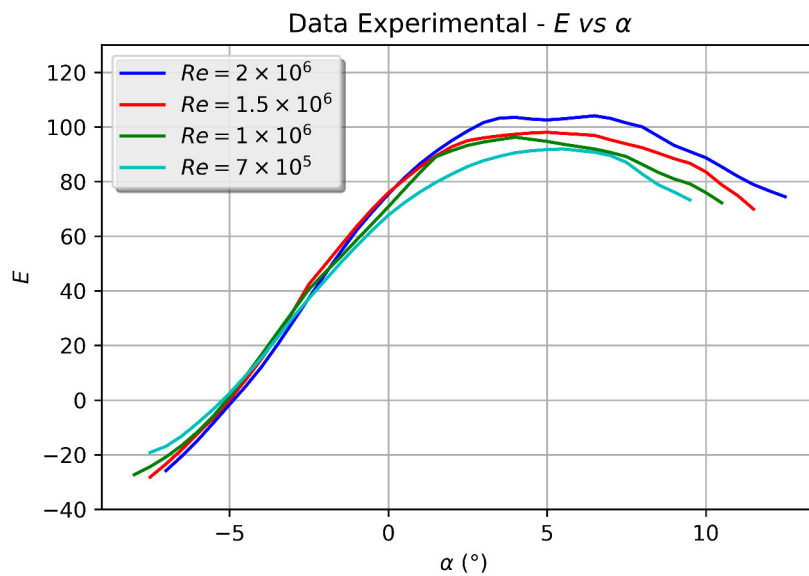
Obteniendo finalmente los coeficientes aerodinámicos de sustentación, arrastre y momento como se muestra en las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 respectivamente.

FIGURA 3.3: Data experimental C_l vs α FIGURA 3.4: Data experimental C_d vs α

FIGURA 3.5: Data experimental C_m vs α

Señalamos que en la extracción de los coeficientes de sustentación no se presentó inconveniente alguno. Sin embargo, en el caso de los coeficientes de arrastre, la extracción de datos estuvo limitada al máximo valor del coeficiente de sustentación de la curva C_l vs C_d en la Figura 3.2, lo cual nos permitió extraer valores del coeficiente de arrastre hasta ángulos de ataque entre 9° a 13° .

Definimos la eficiencia aerodinámica E como la relación entre el coeficiente de sustentación C_l entre el coeficiente de resistencia C_d . ($E = C_l/C_d$

FIGURA 3.6: Data experimental E vs α

Observamos en la Figura 3.3 que el comportamiento de la curva de sustentación es casi lineal para ángulos menores a aproximadamente 7° . Mientras que para valores del ángulo de ataque α mayores a 7° el comportamiento es creciente no lineal hasta aproximadamente 14° . Posterior a este valor la curva de sustentación tiene tendencia a disminuir.

El ángulo de la máxima eficiencia aerodinámica $\alpha_{max\ c_l/c_d}$ para las curvas de sustentación extraídas se encuentra entre 4° a 5.5° , como se muestra en la Figura 3.6.

Se presenta los coeficientes aerodinámicos obtenidos del Anexo B en los Cuadros 3.1 hasta 3.8.

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-7.5	-0.25	0.01302
-7	-0.19	0.01145
-6.5	-0.14	0.0105
-6	-0.08	0.00988
-5.5	-0.03	0.00936
-5	0.02	0.00883
-4.5	0.07	0.0084
-4	0.13	0.00825
-3.5	0.18	0.00807
-3	0.24	0.00792
-2.5	0.3	0.00795
-2	0.35	0.00795
-1.5	0.4	0.00795
-1	0.45	0.00801
-0.5	0.5	0.00811
0	0.56	0.00825
0.5	0.61	0.00847
1	0.66	0.00867
1.5	0.71	0.0089
2	0.76	0.00916
2.5	0.81	0.00943
3	0.86	0.00978
3.5	0.91	0.01019
4	0.96	0.01061
4.5	1.01	0.01107
5	1.06	0.01155
5.5	1.1	0.01202
6	1.14	0.01253
6.5	1.18	0.01305
7	1.22	0.01367

CUADRO 3.1: $Re = 7.0E05$ Profilkatalog (a)

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
7.5	1.26	0.01451
8	1.3	0.01574
8.5	1.34	0.01697
9	1.37	0.01802
9.5	1.41	0.01921
10	1.43	0.02088
10.5	1.45	0.02263
11	1.47	0.0246
11.5	1.49	0.02681
12	1.5	0.02928
12.5	1.51	0.03204
13	1.52	0.03512
13.5	1.52	0.03853
14	1.53	0.04231
14.5	1.52	0.04649
15	1.5	0.0511
15.5	1.48	0.05616
16	1.45	0.06171
16.5	1.42	0.06778
17	1.4	0.07441
17.5	1.37	0.08164
18	1.35	0.0895
18.5	1.32	0.09802
19	1.3	0.10725
19.5	1.28	0.11724
20	1.27	0.12801
20.5	1.25	0.13961
21	1.24	0.15209
21.5	1.23	0.16549
22	1.21	0.17986

CUADRO 3.2: $Re = 7.0E05$ Profilkatalog (b)

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-8	-0.31	0.01119
-7.5	-0.25	0.01028
-7	-0.2	0.00945
-6.5	-0.15	0.00887
-6	-0.1	0.00838
-5.5	-0.05	0.00799
-5	0.01	0.00758
-4.5	0.06	0.00741
-4	0.12	0.00723
-3.5	0.18	0.00718
-3	0.23	0.00722
-2.5	0.29	0.00724
-2	0.35	0.0075
-1.5	0.4	0.00771
-1	0.46	0.00783
-0.5	0.51	0.00788
0	0.56	0.00791
0.5	0.61	0.00791
1	0.66	0.00795
1.5	0.72	0.00806
2	0.77	0.00847
2.5	0.83	0.00889
3	0.88	0.00931
3.5	0.93	0.00972
4	0.97	0.01013
4.5	1.02	0.01071
5	1.07	0.0113
5.5	1.12	0.01193
6	1.17	0.01257
6.5	1.22	0.01324
7	1.27	0.01398
7.5	1.32	0.01478

CUADRO 3.3: $Re = 1.0E06$ *Profilkatalog (a)*

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
8	1.36	0.01581
8.5	1.41	0.01691
9	1.44	0.01776
9.5	1.46	0.01846
10	1.48	0.01954
10.5	1.51	0.02087
11	1.53	0.0224
11.5	1.55	0.02387
12	1.57	0.02547
12.5	1.58	0.02719
13	1.59	0.02905
13.5	1.59	0.03106
14	1.58	0.03322
14.5	1.56	0.03554
15	1.53	0.03805
15.5	1.5	0.04074
16	1.47	0.04362
16.5	1.44	0.04672
17	1.41	0.05005
17.5	1.38	0.05361
18	1.36	0.05742
18.5	1.34	0.06149
19	1.32	0.06584
19.5	1.3	0.07048
20	1.29	0.07542
20.5	1.27	0.08069
21	1.25	0.08629
21.5	1.24	0.09225
22	1.22	0.09858
22.5	1.2	0.10529
23	1.19	0.11241

CUADRO 3.4: $Re = 1.0E06$ *Profilkatalog (b)*

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-7.5	-0.29	0.01015
-7	-0.23	0.0097
-6.5	-0.17	0.00928
-6	-0.11	0.0089
-5.5	-0.05	0.00829
-5	0	0.00768
-4.5	0.06	0.00759
-4	0.11	0.0074
-3.5	0.17	0.00718
-3	0.22	0.00692
-2.5	0.28	0.00665
-2	0.34	0.00686
-1.5	0.39	0.00695
-1	0.45	0.00703
-0.5	0.5	0.00714
0	0.55	0.00728
0.5	0.6	0.00749
1	0.66	0.0077
1.5	0.71	0.00796
2	0.77	0.00826
2.5	0.82	0.00864
3	0.88	0.00912
3.5	0.93	0.00961
4	0.98	0.01011
4.5	1.03	0.01053
5	1.07	0.01089
5.5	1.11	0.01138
6	1.15	0.01187
6.5	1.2	0.01237
7	1.24	0.01304
7.5	1.29	0.01371
8	1.33	0.01439
8.5	1.37	0.01514
9	1.41	0.01592

CUADRO 3.5: $Re = 1.5E06$ Profilkatalog (a)

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
9.5	1.44	0.01663
10	1.47	0.01765
10.5	1.51	0.01912
11	1.54	0.02053
11.5	1.56	0.02236
12	1.59	0.02332
12.5	1.61	0.02494
13	1.62	0.0267
13.5	1.61	0.02862
14	1.59	0.03071
14.5	1.54	0.03299
15	1.5	0.03545
15.5	1.46	0.03813
16	1.42	0.04103
16.5	1.39	0.04417
17	1.35	0.04756
17.5	1.32	0.05122
18	1.3	0.05517
18.5	1.27	0.05943
19	1.25	0.064
19.5	1.24	0.06891
20	1.23	0.07418
20.5	1.21	0.07983
21	1.19	0.08588
21.5	1.17	0.09234
22	1.16	0.09924
22.5	1.14	0.1066
23	1.14	0.11444
23.5	1.13	0.12279
24	1.13	0.13167
24.5	1.13	0.14109
25	1.14	0.15109
25.5	1.16	0.1617
26	1.17	0.17292

CUADRO 3.6: $Re = 1.5E06$ Profilkatalog (b)

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-7	-0.25	0.00949
-6.5	-0.19	0.00907
-6	-0.13	0.00865
-5.5	-0.07	0.00828
-5	-0.01	0.00803
-4.5	0.04	0.0078
-4	0.09	0.00757
-3.5	0.15	0.00727
-3	0.2	0.00701
-2.5	0.26	0.00686
-2	0.31	0.00678
-1.5	0.37	0.00679
-1	0.43	0.00687
-0.5	0.49	0.00704
0	0.54	0.0072
0.5	0.6	0.00738
1	0.66	0.00759
1.5	0.71	0.00782
2	0.76	0.00804
2.5	0.82	0.00828
3	0.87	0.00854
3.5	0.92	0.00891
4	0.97	0.00939
4.5	1.02	0.00995
5	1.07	0.01045
5.5	1.12	0.01087
6	1.17	0.01127
6.5	1.21	0.01166
7	1.26	0.01222

CUADRO 3.7: $Re = 2.0E06$ *Profilkatalog* (a)

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
7.5	1.31	0.01288
8	1.35	0.01353
8.5	1.4	0.01448
9	1.44	0.01549
9.5	1.48	0.01623
10	1.51	0.01698
10.5	1.54	0.01799
11	1.57	0.01919
11.5	1.61	0.02034
12	1.62	0.02121
12.5	1.64	0.02208
13	1.66	0.02362
13.5	1.68	0.02494
14	1.68	0.02635
14.5	1.63	0.02783
15	1.56	0.0294
15.5	1.51	0.03106
16	1.47	0.0328
16.5	1.43	0.03465
17	1.41	0.0366
17.5	1.39	0.03865
18	1.36	0.04082
18.5	1.34	0.04311
19	1.32	0.04551
19.5	1.3	0.04805
20	1.28	0.05072
20.5	1.27	0.05353
21	1.25	0.05649

CUADRO 3.8: $Re = 2.0E06$ *Profilkatalog* (b)

3.2.2. Coeficientes Xfoil

Mediante la aplicación del software Xfoil obtuvimos los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre para diversos número de Reynolds. Se consideró flujo incompresible debido a que el rango de operación de la turbina no excede el valor del Número de Mach a 0.3. Se especificó también la viscosidad del fluido el cual en nuestro estudio es del aire a 25°C . El N_{crit} es un parámetro que nos permite establecer el nivel de intensidad turbulenta en el Xfoil. Por tanto, definimos el $N_{crit} = 1$ debido a que nos permite representar los efectos de una alta intensidad de turbulencia.

Se presenta los coeficientes aerodinámicos de sustentación, arrastre y momento provenientes del Xfoil en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 respectivamente.

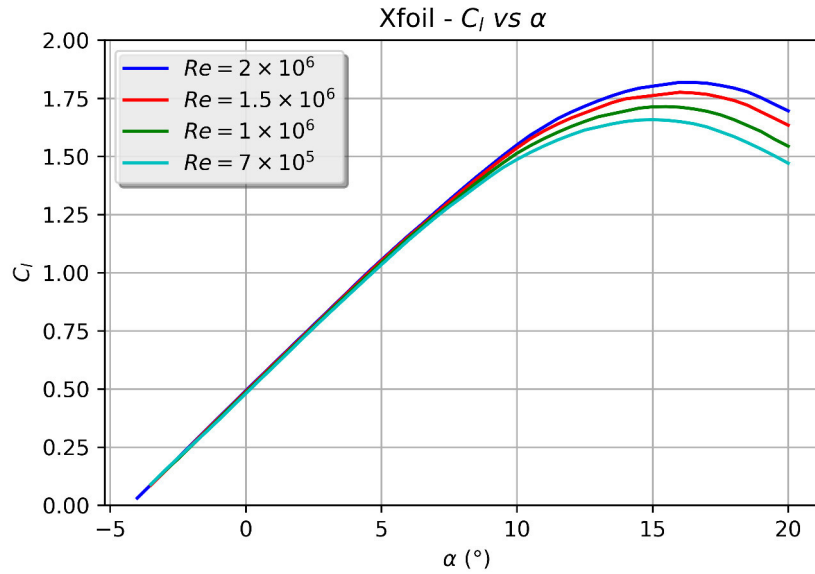
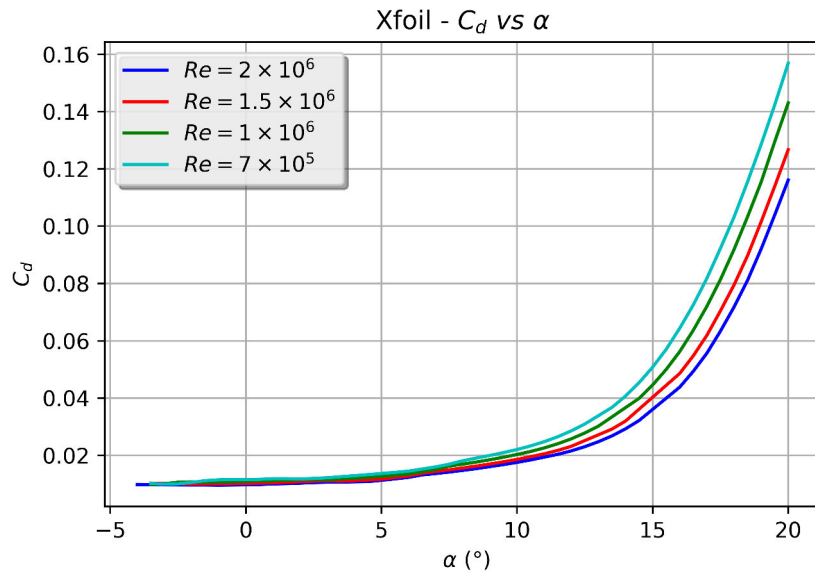
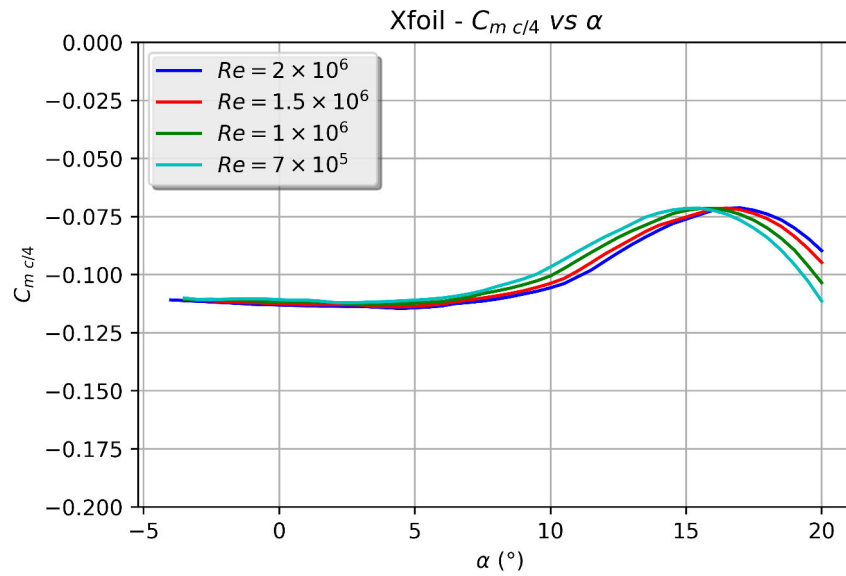


FIGURA 3.7: Xfoil C_l vs α

FIGURA 3.8: Xfoil C_d vs α FIGURA 3.9: Xfoil C_m vs α

La curva de sustentación obtenida por el Xfoil tiene tendencia lineal para valores del ángulo de ataque α menores a aproximadamente 7° , similar a la fuente experimental. Sin embargo, a partir de este valor vemos una tendencia creciente no lineal hasta el valor aproximado de 15° , mayor al descrito experimentalmente. Más allá de este valor la curva tiene tendencia decreciente.

En la curva de resistencia obtenida por el Xfoil apreciamos que para valores de α menores a 0° la curva muestra una tendencia lineal decreciente incorrecta; sin

embargo, a partir de este valor hasta los 10° se encuentran próximos a la fuente experimental.

El ángulo de la máxima eficiencia aerodinámica $\alpha_{max\ c_l/c_d}$ para los datos obtenidos del Xfoil esta aproximadamente alrededor a 5° .

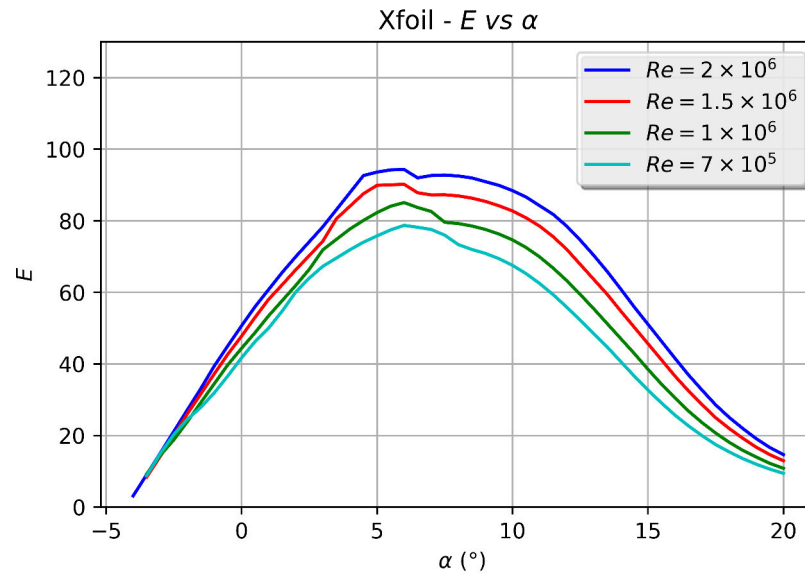


FIGURA 3.10: Xfoil E vs α

Se presentan los coeficientes aerodinámicos obtenidos mediante el Xfoil para los diferentes números de Reynolds $Re = [7.0E5, 1.0E6, 1.5E6, 2.0E6]$ en los Cuadros 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 respectivamente.

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-3.5	0.09	0.0102
-3	0.15	0.0099
-2.5	0.2	0.01005
-2	0.26	0.01051
-1.5	0.31	0.01115
-1	0.37	0.01145
-0.5	0.42	0.01153
0	0.48	0.01152
0.5	0.54	0.01161
1	0.59	0.01185
1.5	0.65	0.01186
2	0.71	0.01176
2.5	0.76	0.01192
3	0.82	0.01216
3.5	0.87	0.01254
4	0.93	0.01289
4.5	0.98	0.01325
5	1.03	0.01365
5.5	1.09	0.01404
6	1.14	0.01448
6.5	1.19	0.01521
7	1.24	0.01596
7.5	1.28	0.0169
8	1.33	0.01809
8.5	1.37	0.01904
9	1.41	0.01994
9.5	1.45	0.02094
10	1.49	0.02202
10.5	1.52	0.02327
11	1.55	0.02474
11.5	1.57	0.02647
12	1.59	0.02852
12.5	1.61	0.03092
13.5	1.64	0.0367
14	1.65	0.04066
14.5	1.66	0.04534
15	1.66	0.05075
15.5	1.66	0.05699
16	1.65	0.06436
16.5	1.64	0.07251
17	1.63	0.08176
17.5	1.61	0.09223
18	1.59	0.10312
18.5	1.56	0.11546
19	1.53	0.12847
19.5	1.5	0.14225
20	1.47	0.15689

CUADRO 3.9: $Re = 7.0E05$ *XFoil*

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-3.5	0.09	0.00979
-3	0.15	0.01009
-2.5	0.2	0.01059
-2	0.26	0.01072
-1.5	0.31	0.01071
-1	0.37	0.01073
-0.5	0.43	0.01075
	0.48	0.01092
0.5	0.54	0.01109
1	0.6	0.01118
2	0.71	0.01147
2.5	0.77	0.01154
3	0.82	0.01146
3.5	0.88	0.01175
4	0.93	0.01202
4.5	0.99	0.01234
5	1.04	0.01267
5.5	1.1	0.01304
6	1.15	0.0135
6.5	1.2	0.01431
7	1.25	0.01509
7.5	1.29	0.01623
8	1.34	0.01691
8.5	1.39	0.01765
9	1.43	0.01845
9.5	1.47	0.01932
10	1.51	0.02028
10.5	1.55	0.02133
11	1.58	0.02256
11.5	1.6	0.02402
12	1.63	0.02574
12.5	1.65	0.02779
13	1.67	0.03017
14.5	1.71	0.03986
15	1.71	0.04453
15.5	1.71	0.04996
16	1.71	0.05621
16.5	1.7	0.06366
17	1.69	0.07199
17.5	1.68	0.08134
18	1.66	0.0918
18.5	1.63	0.10325
19	1.61	0.11534
19.5	1.57	0.12941
20	1.54	0.14302

CUADRO 3.10: $Re = 1.0E06$ *XFoil*

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-3.5	0.09	0.01026
-3	0.14	0.01017
-2.5	0.2	0.0101
-2	0.26	0.00997
-1.5	0.32	0.01002
-1	0.37	0.01005
-0.5	0.43	0.0101
0	0.49	0.01024
0.5	0.55	0.0103
1	0.6	0.01039
1.5	0.66	0.01061
2	0.72	0.01079
2.5	0.77	0.01098
3	0.83	0.01114
3.5	0.89	0.01099
4.5	1	0.01138
5	1.05	0.01169
6	1.16	0.01281
6.5	1.2	0.01371
7	1.25	0.01438
7.5	1.3	0.01495
8	1.35	0.01557
8.5	1.4	0.01624
9	1.45	0.01696
9.5	1.49	0.01774
10	1.54	0.01857
10.5	1.58	0.01951
11	1.61	0.02051
11.5	1.64	0.0217
12	1.67	0.02313
13.5	1.73	0.02915
14	1.75	0.03194
16	1.78	0.04858
16.5	1.77	0.05473
17	1.77	0.06186
17.5	1.75	0.07041
18	1.74	0.07943
18.5	1.72	0.08967
19	1.69	0.10147
19.5	1.66	0.11386
20	1.63	0.12667

CUADRO 3.11: $Re = 1.5E06$ XFoil

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
-4	0.03	0.00982
-3.5	0.09	0.00976
-3	0.15	0.00971
-2.5	0.2	0.00967
-2	0.26	0.00964
-1.5	0.32	0.00964
-1	0.38	0.00956
-0.5	0.43	0.00964
0	0.49	0.00972
0.5	0.55	0.00981
1	0.61	0.00997
1.5	0.66	0.01011
2	0.72	0.01028
2.5	0.78	0.01046
3	0.83	0.01062
4.5	1	0.01081
5	1.05	0.01127
5.5	1.11	0.01176
6	1.16	0.0123
6.5	1.21	0.01315
7	1.26	0.01362
7.5	1.31	0.01415
8	1.36	0.01473
8.5	1.41	0.01535
9.5	1.51	0.01675
10	1.55	0.01753
10.5	1.59	0.01838
11.5	1.66	0.02033
12	1.69	0.02154
12.5	1.72	0.02301
13	1.74	0.02474
13.5	1.76	0.02677
14	1.78	0.02923
14.5	1.79	0.03213
16	1.82	0.0438
16.5	1.82	0.04932
17	1.81	0.05563
17.5	1.81	0.06333
18	1.79	0.07173
18.5	1.78	0.08108
19	1.75	0.09198
19.5	1.72	0.10385
20	1.7	0.11607

CUADRO 3.12: $Re = 2.0E06$ XFoil

3.2.3. Coeficientes CFD

En la Capítulo ?? se describe el procedimiento para la simulación del perfil y en la Sección 7.1 se presentan los resultados obtenidos mediante el software ANSYS CFX.

Capítulo 4

Análisis aerodinámico de la turbina eólica

4.1. Antecedentes de la turbina eólica

La turbina eólica *Waira 12* diseñada y gestionada por la empresa Waira Energía SAC y financiada por Innóvate Perú y con la colaboración de la Pontificia Universidad Católica del Perú – PUCP, Redondos S.A. y Fundición Ferrosa S.A.C. pertenece al proyecto 217 FINCyT - FIDECOM PIPEA 201. El lugar de ubicación del proyecto es en el distrito de Huarmey, localidad del mismo nombre, a la altura del km 250 de la panamericana norte donde la potencia total instalada del proyecto consiste en 35kW, perteneciendo 10 kW a paneles fotovoltaicos y 25 kW a la turbina eólica *Waira 12*. Las dimensiones y características de la turbina serán descritas en la siguiente Sección [4.2](#).

4.2. Descripción de la turbina eólica

Los parámetros de diseño proporcionados por la empresa Waira Energía SAC se presentan en el Cuadro [4.1](#) y en el Cuadro [4.2](#) se presenta la configuración de la geometría de la pala de la turbina eólica. En el Anexo [G](#) encontramos el modelo de la turbina en mención.

Parámetros de diseño	Variable	Valores
Diámetro del rotor	D	12 m
Altura del eje	H	15 m
Potencia Nominal	P_d	25 kW
Velocidad del viento	V_d	10.5 m/s
Velocidad de rotación	ω_d	120 rpm
TSR	λ_d	7.18
Número de palas	Z	3
Tipo de perfil	–	FX 60-126

CUADRO 4.1: Parámetros de diseño Waira12

<i>Estación</i>	<i>Radio (m)</i>	<i>Cuerda (m)</i>	<i>Twist (°)</i>
1	0.72	–	–
2	0.96	–	–
3	1.2	0.995	18.8
4	1.44	0.93	16
5	1.68	0.845	13.6
6	1.92	0.77	11.6
7	2.16	0.7	10.1
8	2.4	0.645	8.8
9	2.64	0.585	7.6
10	2.88	0.538	6.6
11	3.12	0.502	5.9
12	3.36	0.464	5.1
13	3.6	0.433	4.5
14	3.84	0.408	4
15	4.08	0.387	3.4
16	4.32	0.365	3.2
17	4.56	0.345	2.7
18	4.8	0.33	2.2
19	5.04	0.308	2
20	5.28	0.29	1.4
21	5.52	0.275	1.1
22	5.76	0.255	0.7
23	6	0.14	0.5

CUADRO 4.2: Descripción de la pala por estaciones

4.3. Descripción del modelo de BEM

Denominaremos a la teoría descrita en la Sección 2.2.5 como *modelo de BEM* (Blade Element Momentum). Este modelo calcula la potencia y el empuje generado por una turbina eólica de eje horizontal vinculando la teoría de perfil aerodinámico y las ecuaciones de conservación de masa y de la cantidad de movimiento.

En terminos generales el modelo de BEM permite calcular la potencia y empuje de una turbina eólica ingresando los parámetros de la turbina. Sin embargo, para fines de este trabajo, estableceremos dos escenarios al generar el código en base al modelo de BEM, estos escenarios son:

- 1. **Escenario de diseño:** En el escenario de diseño se ingresan los parámetros de diseño los cuales son las condiciones de operación de la turbina eólica. Entre estos tenemos a la velocidad del viento, diámetro del rotor, tip speed ratio y la información del perfil aerodinámico. Finalmente se obtiene los parámetros geométricos de la turbina eólica (radio, cuerda, torsión), la potencia y empuje generado.
- 2. **Escenario de performance:** En el escenario de performance se tiene previamente un modelo de turbina eólica disponible, conociendo sus parámetros de operación y geométricos pero se desconoce la potencia y el empuje que generan. Estos parámetros conocidos se ingresan en el código con la finalidad de obtener la potencia y el empuje que genera la turbina eólica.

En ambos escenarios descritos se necesita la información de los coeficientes de sustentación y arraste del perfil aerodinámico seleccionado en función del ángulo de ataque y el número de Reynolds.

4.4. Desarrollo del modelo de BEM

En la Sección 2.2.5 se presentó la teoría para el modelo de BEM y en este apartado describiremos el procedimiento iterativo para el cálculo del modelo. Para mayor detalle se invita al lector a revisar el Anexo C.

1. Inicializar los coeficientes de inducción axial y tangencial a y a' , generalmente $a = a' = 0$.
2. Calcular el ángulo de flujo ϕ .
3. Calcular el ángulo de ataque α .
4. Calcular el número de Reynolds Re .
5. Seleccionar los coeficientes aerodinámicos C_l y C_d en función al ángulo de ataque y Reynolds.
6. Calcular los componentes C_n y C_t .
7. Calcular los coeficientes de inducción a y a' .
8. Verificar que a y a' sean menores al nivel de tolerancia especificado, de lo contrario, regresar al paso (2).
9. Calcular la potencia y empuje de la pala.

4.5. Validación del modelo de BEM

Se procedió a verificar el código desarrollado en base al modelo de BEM para el análisis de potencia de dos turbinas eólicas las cuales se tiene disponible su información de operación y geometría de la pala.

La validación del código se realizó comparando los resultados del modelo de BEM con los obtenidos en las siguientes publicaciones las cuales denominaremos:

- 4.5.1 OPT HAWT NACA 4418 - *The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine* [7]
- 4.5.2 OPT HAWT NACA 4412 - *Small Wind Turbines* [8]

4.5.1. OPT HAWT NACA 4418

La turbina eólica descrita por Hsiao et al [7], la cual denominaremos OPT HAWT NACA 4418, emplea el perfil aerodinámico NACA 4418 a lo largo de toda la pala.

El término OPT (*Optimum Blade Shape*) hace referencia a la geometría optima de la pala donde la cuerda y el ángulo de torsión varían a lo largo de la pala de forma optima de acuerdo al modelo de BEM.

En el Cuadro 4.3 y 4.4 se presentan los parámetros de diseño y la distribución de la geometría de la pala perteneciente a la turbina eólica OPT HAWT NACA 4418 respectivamente. El Cuadro 4.5 muestra los resultados experimentales obtenidos por Hsiao [7].

Parametros de diseño	Valores
Potencia Nominal (W)	50
Velocidad del viento (m/s)	10
Tip speed ratio	5
Número de palas	3
Ángulo de ataque	5.5
Tipo de perfil	NACA 4418

CUADRO 4.3: OPT HAWT NACA 4418

Para el cálculo de potencia y empuje mediante el modelo de BEM se usaron las condiciones de operación experimentales descritas por Hsiao [7], las cuales son $V = 10m/s$ y $\lambda = 4.92$.

Los coeficientes aerodinámicos requeridos para el código se obtuvieron del XFOIL para $N_{crit} = 1$ (1.1966 % nivel turbulencia), el cual cuenta con el perfil NACA 4418 en su base de datos para generar la información aerodinámica necesaria.

Estacion	r/R	Airfoil	Cuerda (m)	$Twist$ (°)
1	0.17	NACA4418	0.096	25.92
2	0.26	NACA4418	0.085	17.56
3	0.35	NACA4418	0.072	12.2
4	0.44	NACA4418	0.061	8.61
5	0.54	NACA4418	0.053	6.08
6	0.63	NACA4418	0.046	4.21
7	0.72	NACA4418	0.041	2.78
8	0.81	NACA4418	0.036	1.65
9	0.91	NACA4418	0.033	0.75
10	1	NACA4418	0.03	0

CUADRO 4.4: Parámetros geométricos OPT HAWT NACA 4418

Resultados Experimentales	Valores
Power Coefficient	0.428
Tip Speed Ratio	4.92

CUADRO 4.5: Resultados experimentales OPT HAWT NACA 4418 [7]

En el Anexo D se muestran los resultados obtenidos al ingresar los coeficientes aerodinámicos del NACA 4418 y las condiciones de operación experimentales del HAWT OPT NACA 4418 descritas anteriormente.

Finalmente, se procesaron los resultados del Anexo 2 y se obtuvieron los valores de la potencia y del empuje de la turbina en estudio haciendo uso de las teorías de Hansen [2] y Wood [8]. Se presenta en el Cuadro 4.6 el resumen de los resultados.

$XFoil$	$P(W)$	$T(N)$	C_P	C_T
Hansen's Theory	109.6	23.2	0.431	0.91
Wood's Theory	111.4	24.7	0.438	0.97

CUADRO 4.6: OPT HAWT NACA 4418 $N_{crit}=1$

Observamos que el C_P que más se aproxima es de la teoría según Hansen [2] comparando con los resultados experimentales del Cuadro 4.5, demostrando que el modelo desarrollado es válido para los valores de los coeficientes aerodinámicos ingresados en el código. Cabe resaltar que el C_p obtenido por la teoría de Wood [8] sobreestima la potencia y empuje generado.

4.5.2. OPT HAWT NACA 4412

La turbina eólica descrita en Wood [8], la cual denominaremos OPT HAWT NACA 4412, emplea a lo largo de toda su pala el perfil aerodinámico NACA4412.

En el Cuadro 4.7 y 4.8 se presentan los parámetros de diseño y distribución de la geometría de la pala de la turbina eólica OPT HAWT NACA 4412 respectivamente.

Wood [8] calculó de forma numérica su coeficiente de potencia y empuje, donde los resultados el cual se muestra en el Cuadro 4.9.

Parametros de operacion	Valores
Velocidad del viento	10
Tip speed ratio	10
Número de palas	2
Tipo de perfil	NACA 4412

CUADRO 4.7: HAWT NACA 4412

Estacion	r (m)	Airfoil	Cuerda (m)	<i>Twist</i> (°)
1	0.2	NACA4412	0.253	24.73
2	0.29	NACA4412	0.205	16.77
3	0.38	NACA4412	0.169	11.28
4	0.47	NACA4412	0.14	7.61
5	0.56	NACA4412	0.119	5.23
6	0.65	NACA4412	0.103	3.7
7	0.74	NACA4412	0.091	2.65
8	0.83	NACA4412	0.082	1.87
9	0.92	NACA4412	0.075	1.21
10	1.01	NACA4412	0.069	0.63
11	1.1	NACA4412	0.063	0.17
12	1.19	NACA4412	0.058	−0.26
13	1.28	NACA4412	0.054	−0.68
14	1.37	NACA4412	0.05	−1.11
15	1.46	NACA4412	0.047	−1.53

CUADRO 4.8: Parametros geometricos HAWT NACA 4412

Resultados BEM	Valores
Power Coefficient	0.461
Thrust Coefficient	0.812

CUADRO 4.9: Resultados codigo de BEM (Wood's Theory)

Para el cálculo de la potencia y del empuje mediante el modelo de BEM se usaron las condiciones de operación descritas por Wood [8], donde $V = 10 \text{ m/s}$ y $TSR = 10$ y los coeficientes aerodinámicos obtenidos por el Xfoil para $N_{crit} = 1$ (1.1966 % nivel turbulencia).

En el Anexo E se muestran los resultados obtenidos al ingresar los coeficientes aerodinámicos del Naca 4412 y las condiciones de operación del HAWT OPT NACA 4412 descritas anteriormente.

Finalmente, de forma análoga a la sección anterior se procesaron los resultados del Anexo E y se obtuvieron los valores de la potencia y del empuje de la turbina. De igual manera se implementó el cálculo haciendo uso de las teorías de Hansen [2] y Wood [8]. Se presenta en el Cuadro 4.10 el resumen de los resultados.

<i>XFoil</i>	$P(kW)$	$T(N)$	C_P	C_T
Hansen's Theory	1.9	358.6	0.45	0.845
Wood's Theory	2	383.1	0.473	0.903

CUADRO 4.10: HAWT OPT Naca 4412 $N_{crit}=1$

Observamos que el código desarrollado predice de forma acertada los resultados provenientes del Xfoil para $N_{crit} = 1$ de manera análoga a la sección previa. El valor del C_P con mayor proximidad es el obtenido mediante la teoría de Hansen, mientras que el obtenido por la teoría de Wood tiende a sobreestimar de igual manera los valores de potencia y empuje adimensionales. Sin embargo, estas sobre estimaciones no son mayores a un 7 % en los valores dimensionales de potencia y empuje.

Finalmente, se demostró según los apartados 4.5.1 y 4.5.2 que el código propio elaborado en base al modelo de BEM es válido según los valores de los coeficientes aerodinámicos ingresados, mostrando una gran proximidad entre los resultados experimentales y numéricos.

Capítulo 5

Simulación fluidodinámica del perfil Wortmann FX 60-126

5.1. Generación del volumen de control

Definido el perfil aerodinámico Wortmann FX 60-126 en la Sección 3.1 procederemos a definir el volumen de control para la simulación fluidodinámica.

Para ello haremos uso de la herramienta SpaceClaim la cual nos permite insertar el perfil descrito previamente y generar el volumen de control de acuerdo a la Figura 5.1.

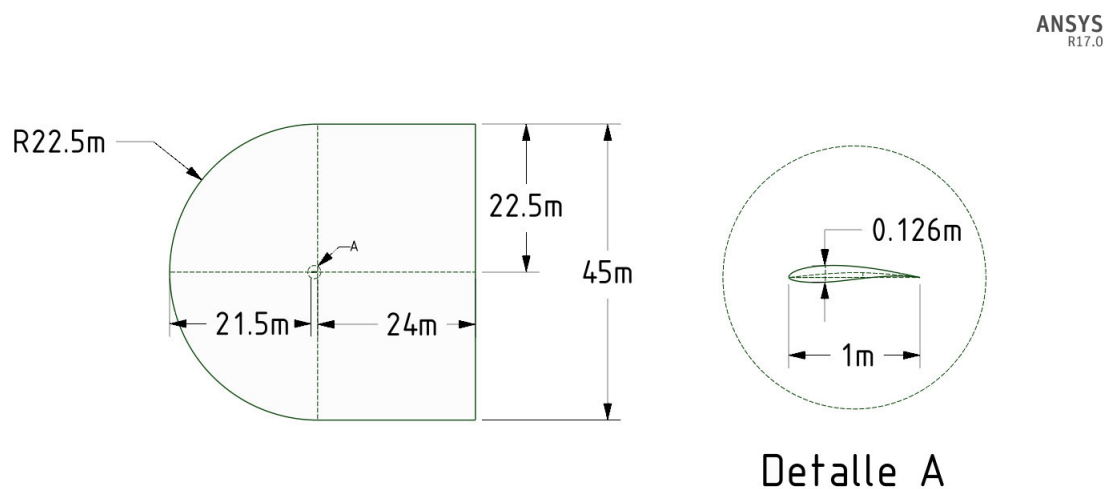


FIGURA 5.1: Dimensión del volumen de control del perfil aerodinámico

Una vez dimensionado nuestro boceto obtenemos el volumen de control que usaremos en la simulación, Figura 5.2 y 5.3.

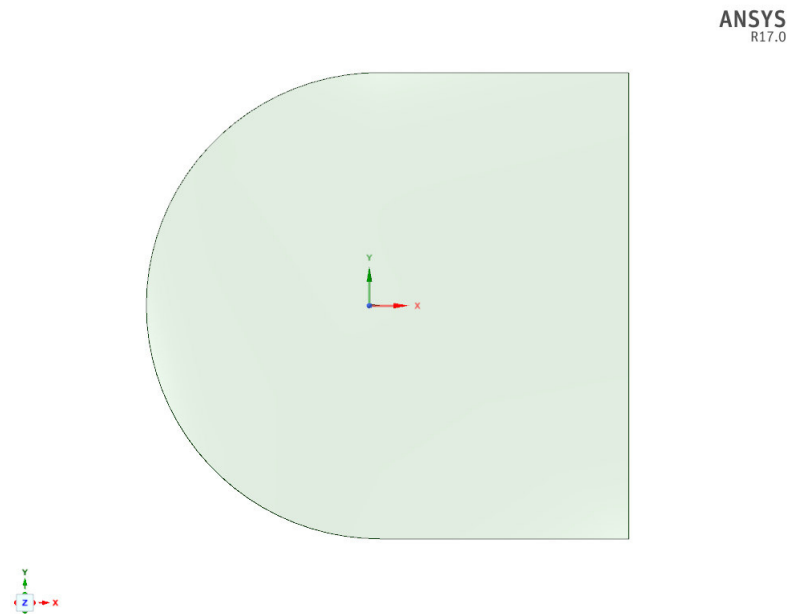


FIGURA 5.2: Volumen de control perfil aerodinamico

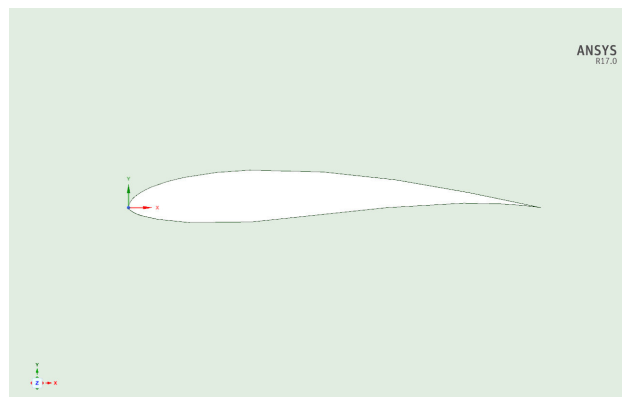


FIGURA 5.3: Volumen de control perfil aerodinámico

5.2. Generación de la malla

En esta etapa de discretización del volumen de control del perfil aerodinámico, el cual fue mostrado en la sección 5.1, se generaron diversas mallas las cuales fueron orientados a mantener un skewness menor a 0.9 y a obtener aproximadamente un $y+ \approx 1$.

Para ello se realizó el calculo para estimar la distancia del primer elemento desde la pared y se definió la distancia en 5×10^{-6} .

Posteriormente se desarrolló 3 diferentes mallas usando la herramienta ICEM ANSYS. Esta herramienta permitió construir una malla altamente estructurada debido a la simplicidad del dominio bidimensional del perfil. Las mallas generadas son gruesa, media y fina, las cuales denominaremos malla MP3, MP2 y MP1 respectivamente.

En el Cuadro 5.1 se muestra los parámetros de las mallas MP1, MP2 y MP3..

Resolución de Malla	MP3	MP2	MP1
Numero de Nodos	87,924	$1.827 \cdot 10^5$	$3.661 \cdot 10^5$
Numero de Elementos	43,962	91,352	$1.83 \cdot 10^5$
Skewness	0.117	0.107	0.103
Max Skewness	0.514	0.519	0.517
Altura 1ra capa	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

CUADRO 5.1: Parámetros de mallas MP1, MP2 y MP3

En la Figura 5.4 se describe la creación de las líneas guías para la generación de las mallas MP1, MP2 y MP3.

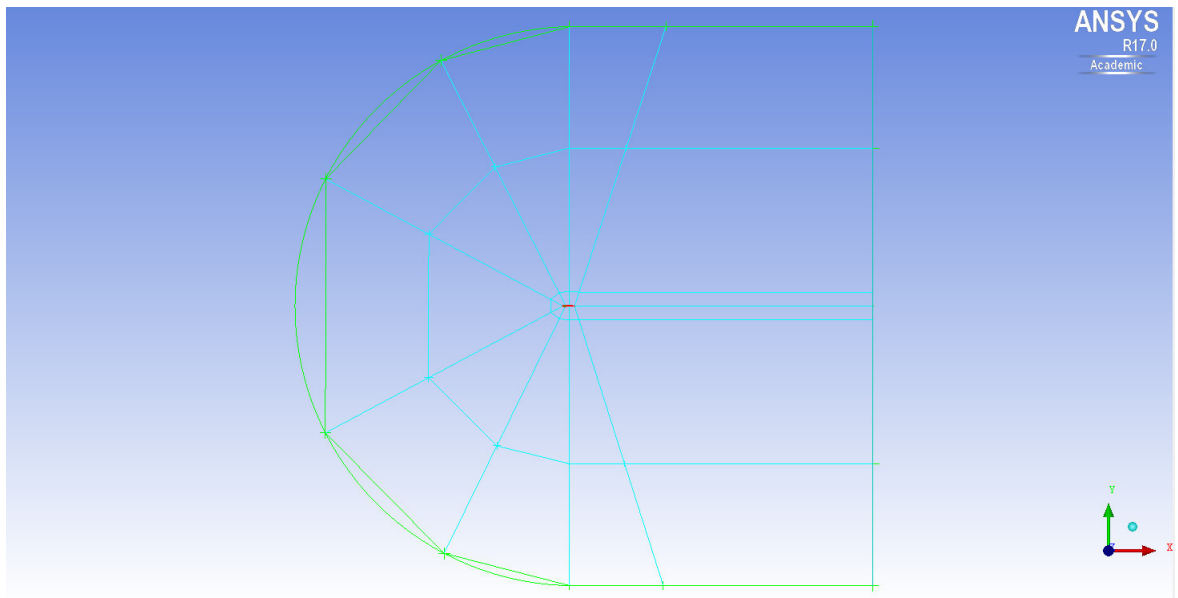


FIGURA 5.4: Estructuración de las mallas MP1,MP2 y MP3

Finalmente en las Figuras 5.5, 5.6 y 5.7 podemos apreciar con mayor claridad la calidad de malla estructurada .

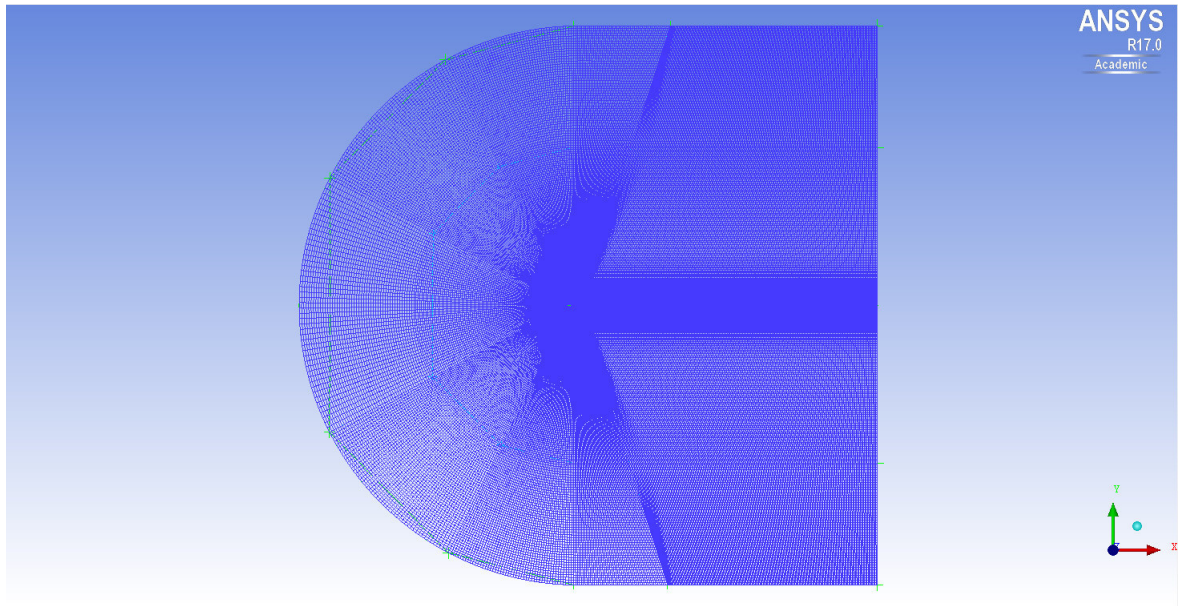


FIGURA 5.5: Malla MP1 - Mallado estructurado

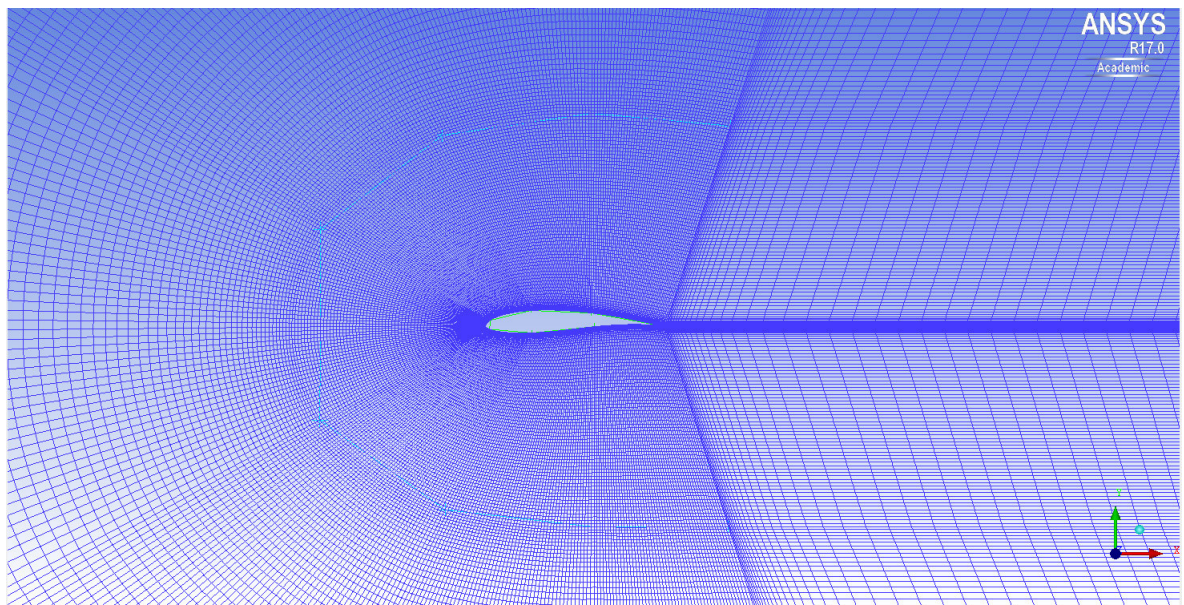


FIGURA 5.6: Malla MP1 - Detalle 1 malla alrededor del perfil aerodinámico

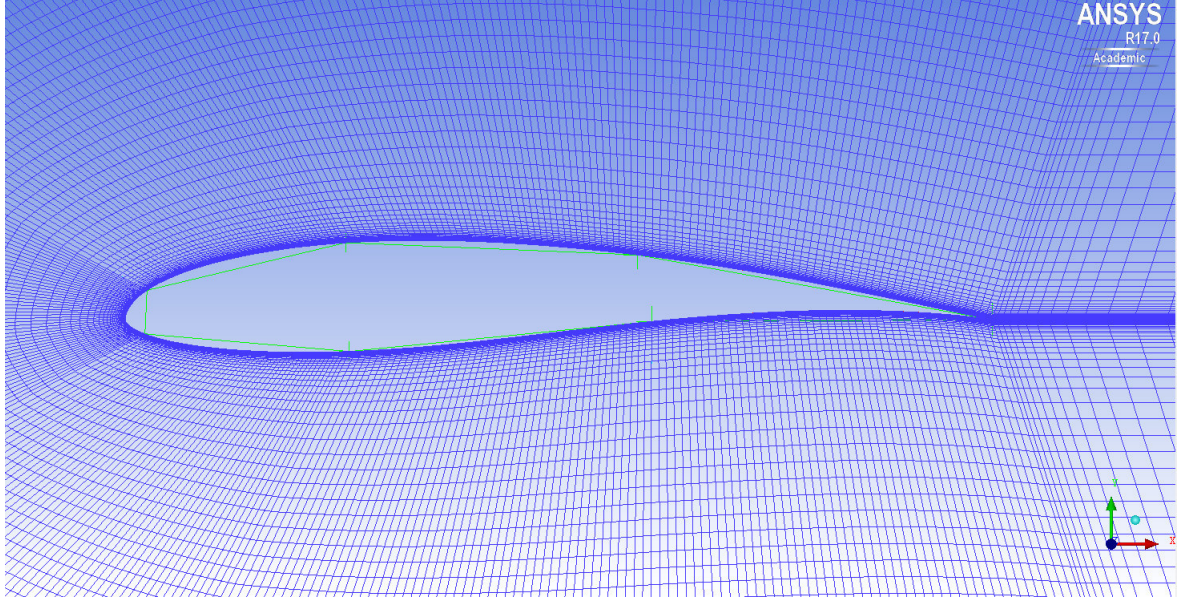


FIGURA 5.7: Malla MP1 - Detalle 2 malla alrededor del perfil aerodinámico

5.3. Condiciones de frontera

En el estudio del perfil aerodinámico Wortmann FX 60-126, el elemento fluido de trabajo es el aire a condiciones ambientales. Para nuestros fines de simulación con el software Ansys CFX seleccionamos el material *Air at 25°C* el cual es el establecido para condiciones de *Standard Ambient Temperature and Pressure (SATP)*. Donde al definir el fluido a 25°C la densidad y la viscosidad adoptando los siguientes valores:

$$\rho = 1.185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \nu = 1.545 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

El modelo de turbulencia seleccionado para la simulación del perfil es el $\kappa - \omega$ *SST*, el cual es una versión mejorada del modelo $\kappa - \omega$ de Wilcox [21]. Este modelo es elegido debido a sus bondades frente a superficies resultando en mejores resultados que sus modelos predecesores.

Una de las parámetros concerniente a esta sección es la velocidad del flujo libre del aire o en términos adimensionales el número de Reynolds, el cual variará en las diferentes simulaciones.

$$Re = \frac{\rho c V}{\mu} = \frac{c V}{\nu} \quad (5.1)$$

Donde :

Re : número de Reynolds

c : cuerda del perfil

ρ : densidad del aire

V : velocidad del aire

μ : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

El número de Reynolds adopta los siguientes valores:

$$Re = [7 \times 10^5, 1 \times 10^6, 1.5 \times 10^6, 2 \times 10^6]$$

Y la longitud característica del perfil aerodinámico es:

$$c = 1 \text{ m}$$

El segundo parámetro de importancia es el *ángulo de ataque* (α), el cual al variar altera la incidencia del flujo libre sobre el perfil aerodinámico, permitiendo obtener los coeficientes aerodinámicos para diferentes condiciones. Los valores correspondientes a la simulación son los siguientes:

$$\alpha = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18]^\circ$$

La presión de referencia en nuestro caso de estudio es la atmosférica, definiendo la presión relativa como:

$$P_{rel} = 0 \text{ [Pa]}$$

Finalmente, la superficie del perfil aerodinámico tiene la condición de no deslizamiento y su superficie se le considera como pared suave (*smooth wall*), que describe una rugosidad igual a 0.

$$h_s = 0$$

Esta simplificación de la rugosidad es debido a que si aumentamos el valor de esta tendríamos que incrementar la cantidad de nodos en donde se produciría la capa límite, incrementando la densidad de la malla cerca de la superficie. En adición, esta elección es aceptada debido a que presenta resultados confiables basados en casos de estudios previos [11].

Las condiciones de frontera para el volumen de control las podemos encontrar en el Cuadro 5.2.

Frontera	Descripción
Tipo dominio	Estacionario
Fluido	Aire a 25°C
Modelo de turbulencia	$\kappa - \omega - SST$
Inlet	Velocidad del aire $V = f(Re, \alpha)$
Outlet	Presión estática promedio $P_{stat} = 0$
Simmetry	Caras paralelas laterales
Airfoil	Condición de no deslizamiento - $h_s = 0$

CUADRO 5.2: Condiciones de frontera del perfil aerodinámico

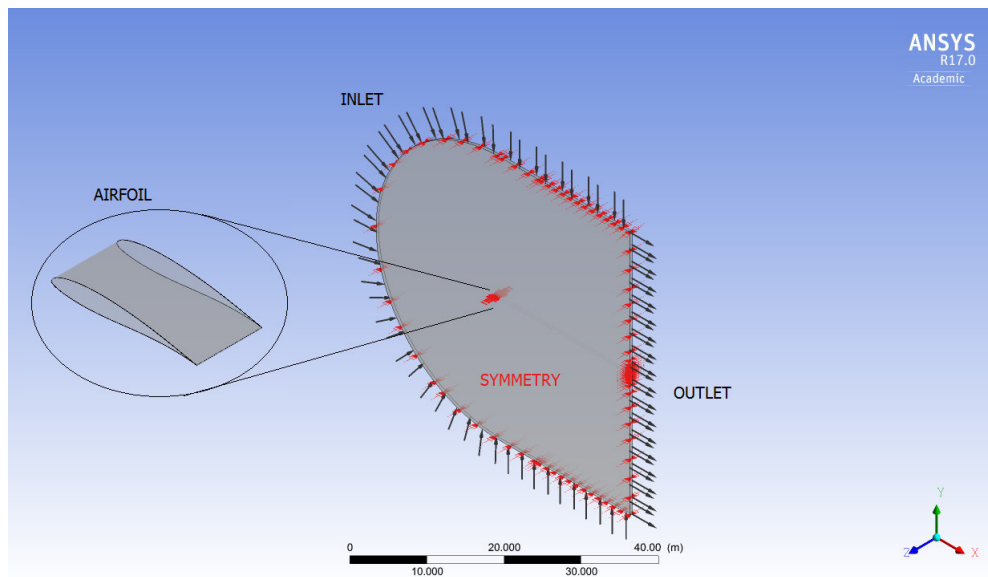


FIGURA 5.8: Condiciones de frontera del perfil aerodinámico

5.4. Convergencia de la simulación

En la simulación del perfil aerodinámico se definió el residual en 1×10^{-6} debido al dominio bidimensional y complejidad menor del mallado. En la Figura 5.9 apreciamos que los residuos satisfacen el criterio definido.

Además, otro indicador de la convergencia de la simulación es el monitoreo de los imbalances, donde se definió en 1 % el imbalance requerido por recomendación del Ansys CFX. En la Figura 5.10 vemos la tendencia de los imbalances y que son menores al criterio establecido.

Finalmente, el monitoreo de los coeficientes de sustentación, arrastre, momento y del y_{+prom} durante la simulación muestran la estabilidad de sus magnitudes a lo largo de las iteraciones tal como se muestra en la Figura 5.11.

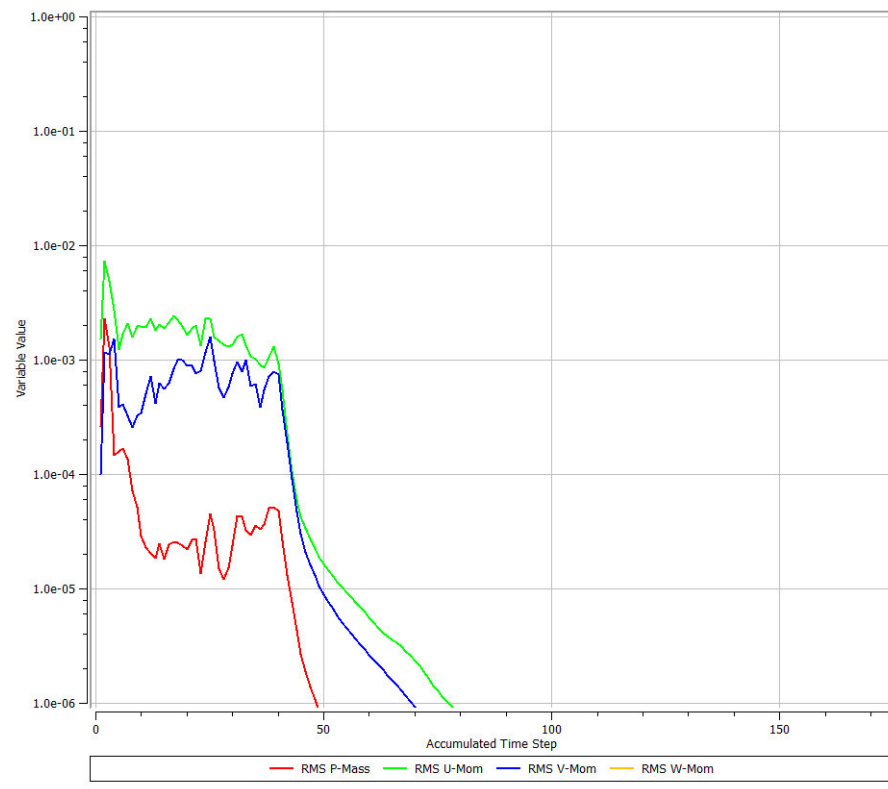


FIGURA 5.9: Residuales de masa y momento

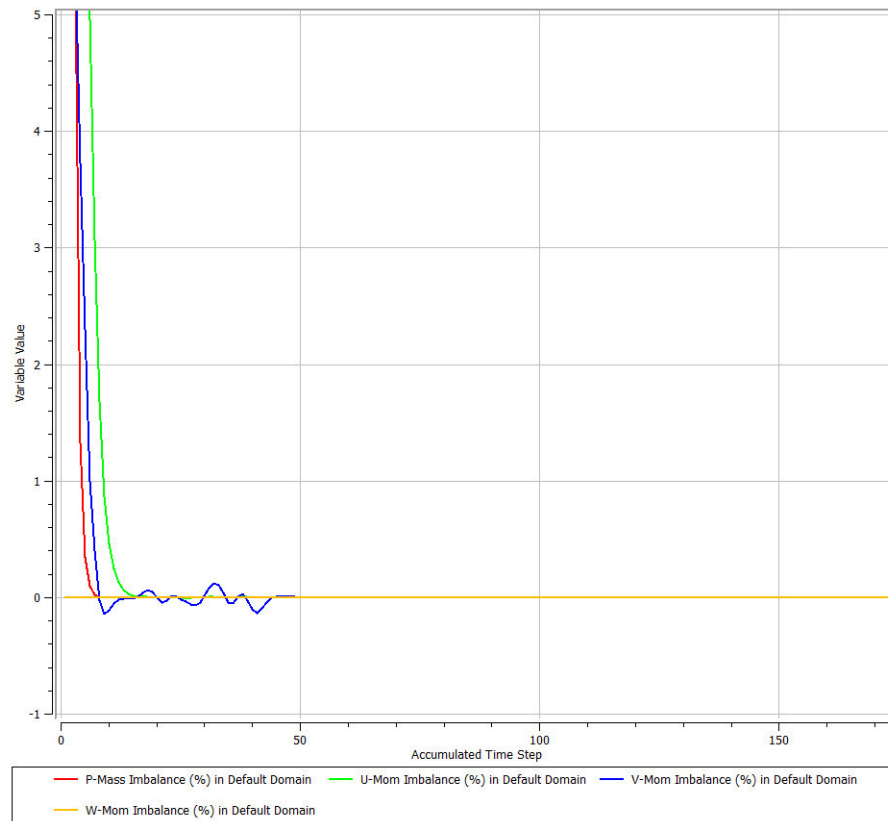


FIGURA 5.10: Residuales de los imbalances

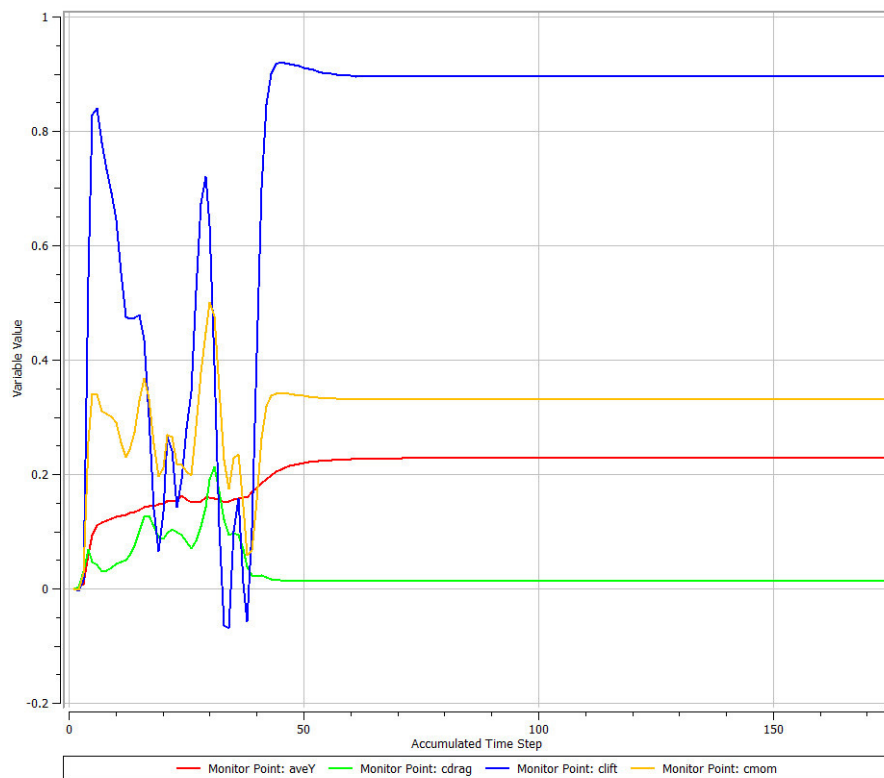


FIGURA 5.11: Monitores: y_{prom} , c_d , c_l , c_m

5.5. Estudio de independencia de malla

En esta sección se presenta el estudio de independencia de las mallas MP1, MP2 y MP3. Para ello se simularon las 3 mallas bajo las mismas condiciones de operación de número de Reynolds 1.5×10^5 y para el ángulo de ataque $\alpha = 4^\circ$.

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 5.3. Se indica que los elementos normalizados es la división entre el número de elementos y el máximo valor de elementos de la malla MP1.

Resolución de Malla	MP3	MP2	MP1
Elementos normalizados	0.2402	0.4991	1
Cl	0.8939	0.9008	0.9053
Cd	0.0138	0.0135	0.0133
Cm	0.329	0.332	0.334
y+ prom	0.3315	0.3307	0.3297
y+ max	0.6525	0.6617	0.6737

CUADRO 5.3: Resultados de las mallas MP1, MP2 y MP3

En el la Figura 5.12 podemos visualizar los resultados del valor del y_+ máximo y promedio respecto a la cantidad de elementos normalizados, estos resultados se mantienen por debajo de la unidad para las 3 diferentes mallas.

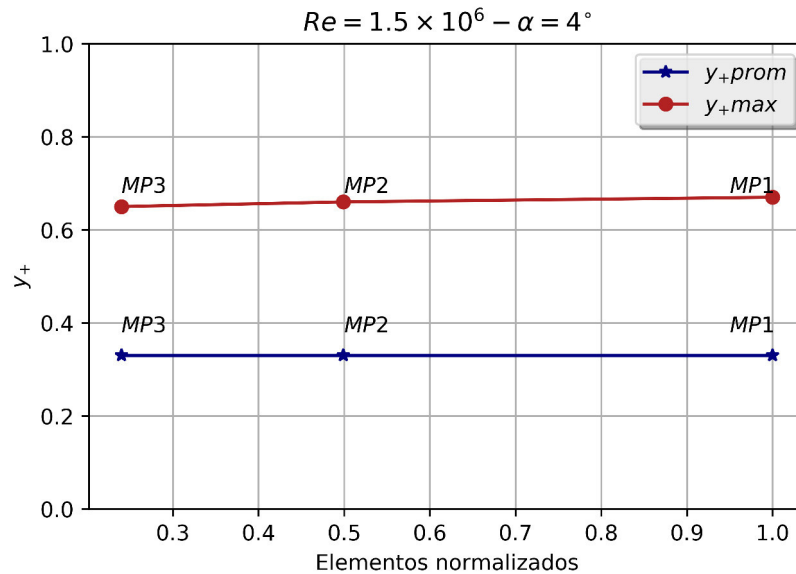
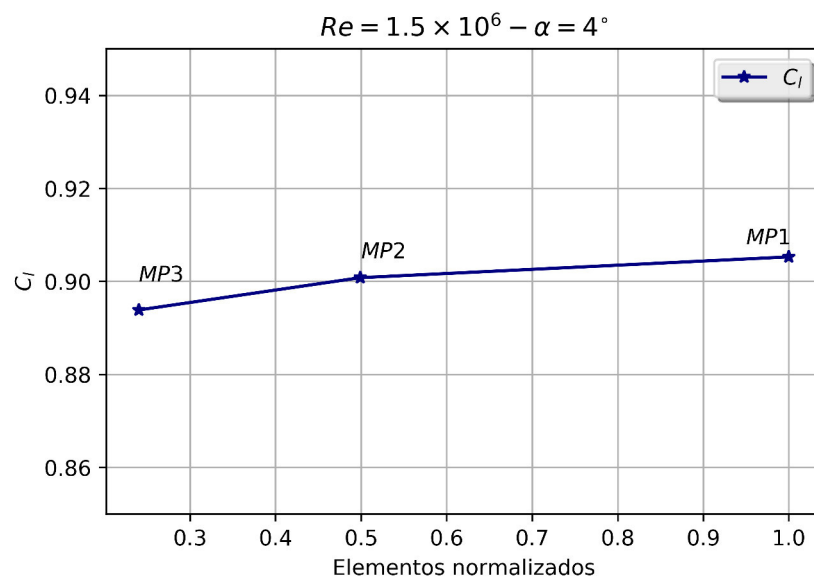


FIGURA 5.12: Valores de y_+ con respecto a los elementos normalizados

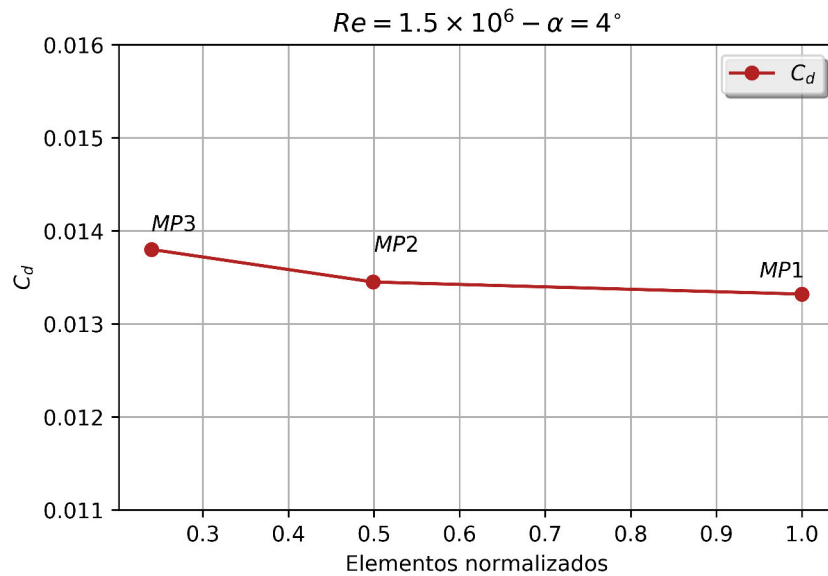
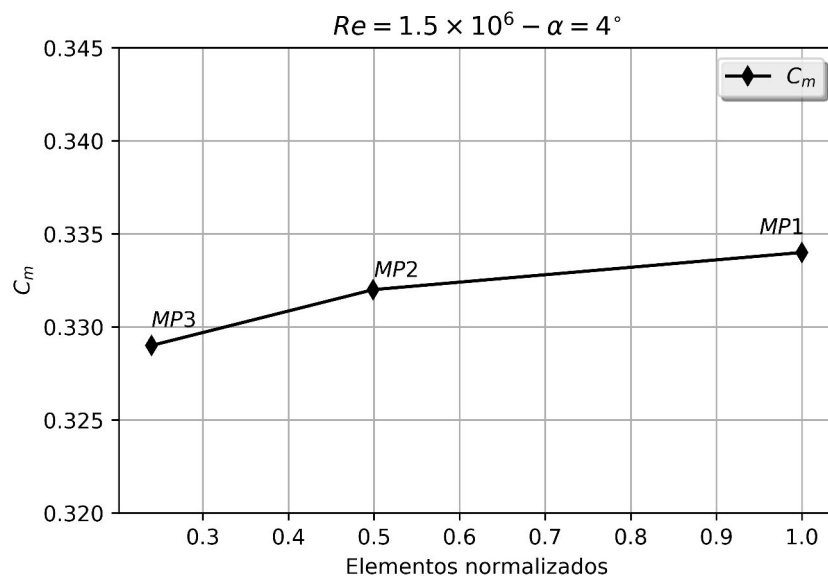
La tendencia de los resultados se puede apreciar en las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15, donde el error relativo entre los valores de las diferentes mallas los podemos visualizar en el Cuadro 5.4.

Error Relativo Mallas	MP3-MP2	MP2-MP1
Elementos normalizados	0.24	0.5
C_l (%)	0.77	0.49
C_d (%)	2.62	0.98
C_m (%)	0.9	0.6

CUADRO 5.4: Resultados de las mallas MP1, MP2 y MP3

FIGURA 5.13: Resultados del c_l respecto a los elementos normalizados

De manera cualitativa debido a las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 podemos apreciar la tendencia asintótica de los resultados. A su vez, de manera cuantitativa, el error relativo entre las mallas MP3 y MP2 es menor a un 3% y el error relativo entre las mallas MP2 y MP1 es menor al 1%.

FIGURA 5.14: Resultados del C_d respecto a los elementos normalizadosFIGURA 5.15: Resultados del C_m respecto a los elementos normalizados

Finalmente, concluimos que con el mallado MP1 obtenemos resultados independientes de la malla con un error relativo menor al 1 %. Cabe indicar que se opta por este resultado debido a que el análisis del perfil aerodinámico es bidimensional y su complejidad en la generación de la malla es menor comparada con elementos más complejos, como el caso de la turbina eólica.

Capítulo 6

Simulación fluidodinámica de la turbina eólica Waira 12

6.1. Generación de la turbina eólica

De acuerdo a la descripción de la turbina eólica en la Sección 4.2, se procedió a modelar la turbina eólica y posteriormente a generar los volúmenes o dominios de control respectivos para el análisis.

Se inició con la creación de las estaciones de la pala de la turbina eólica y en cada estación se insertó el perfil Wortman FX 60-126. Posteriormente estos perfiles fueron escalados y rotados para las magnitudes de cuerda y torsión descritas en la Sección 4.2.

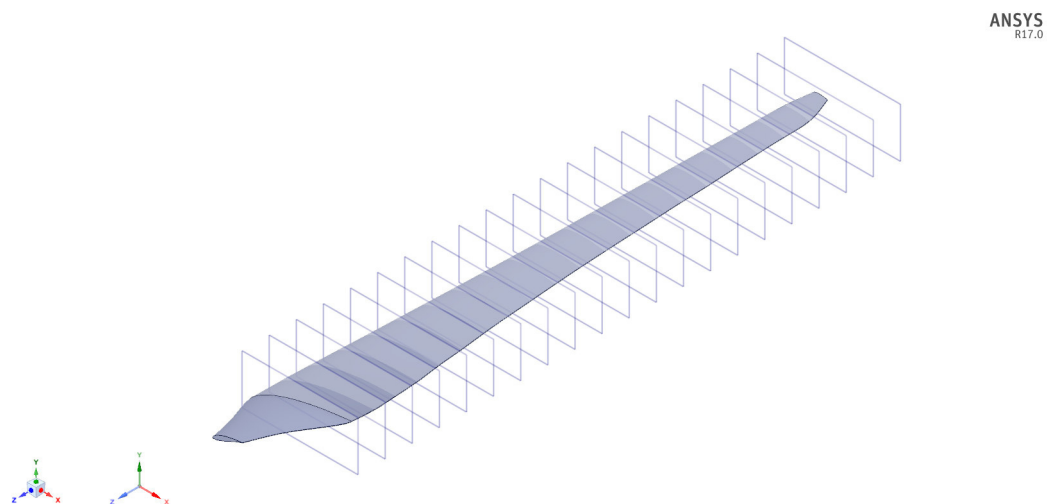


FIGURA 6.1: Estaciones de la pala de la turbina eólica

Posteriormente, en busca de realizar la menor cantidad de simplificaciones en la pala de la turbina eólica, para la raíz de la pala se optó por tomar la sección del perfil aerodinámico escalado para que mantenga la máxima proximidad a la pala generada por la empresa Waira Energía.

Se finalizó el modelado con la creación del Hub, donde obtuvimos finalmente el rotor de la turbina eólica en la Figura 6.2.

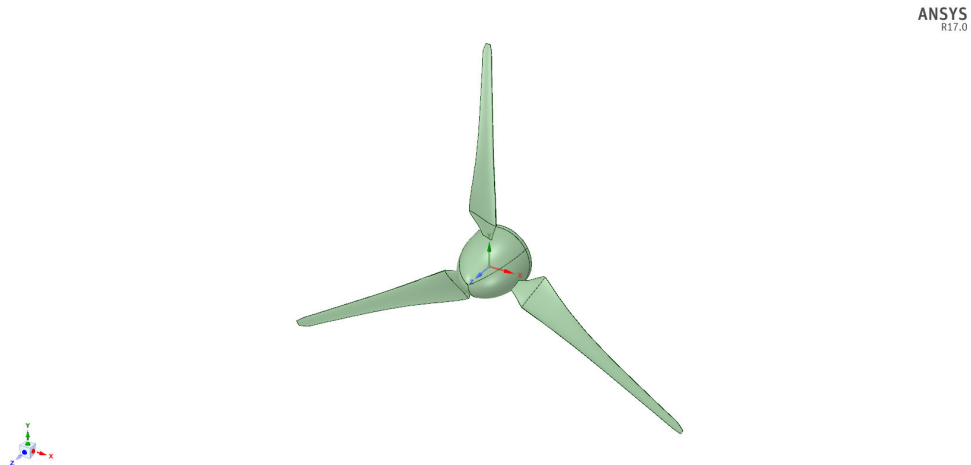


FIGURA 6.2: Vista trimétrica de la turbina eólica

6.2. Generación de los volúmenes de control

Debido al recurso computacional y a recomendaciones bibliográficas [16], la simulación computacional de la turbina eólica se realizó tomando un tercio del rotor. En la Figura 6.3 se muestra una pala del rotor con un tercio del Hub.

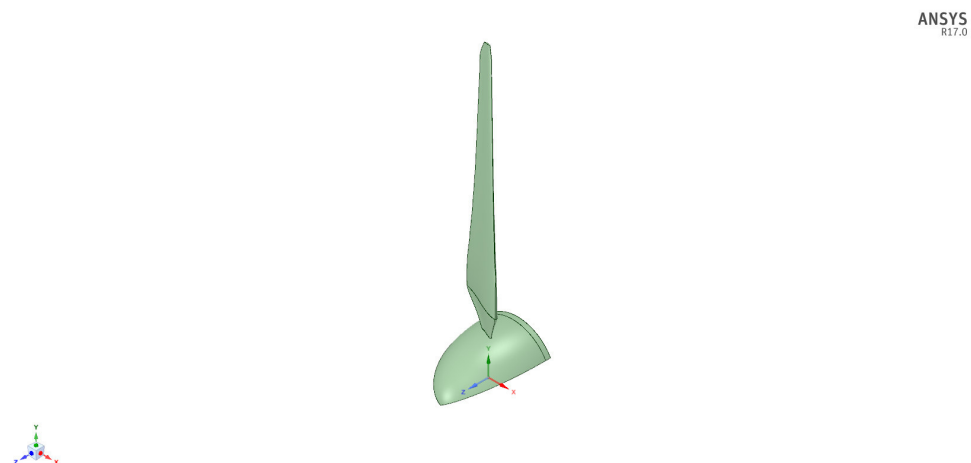


FIGURA 6.3: Vista isométrica de la pala

Una vez definido el elemento a simular, se procedió a generar los volúmenes de control, estos volúmenes los denominaremos *dominio rotatorio* y *dominio estacionario*.

Las dimensiones de ambos volúmenes son mostradas en la Figura 6.4.

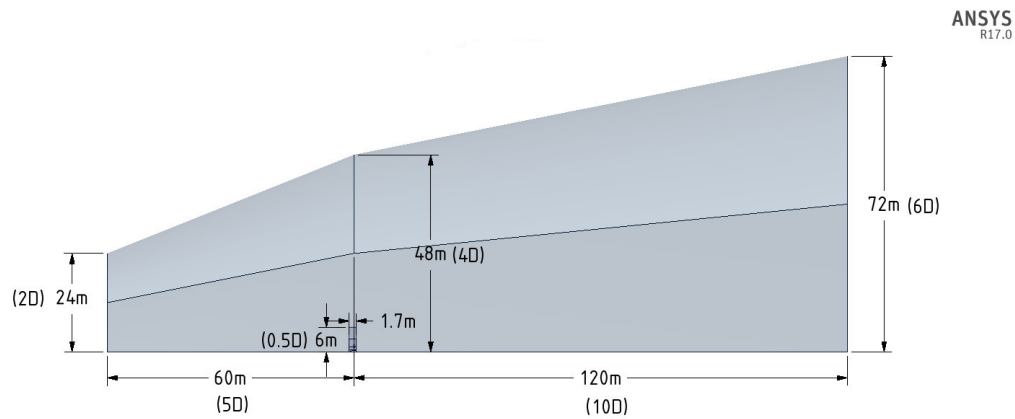
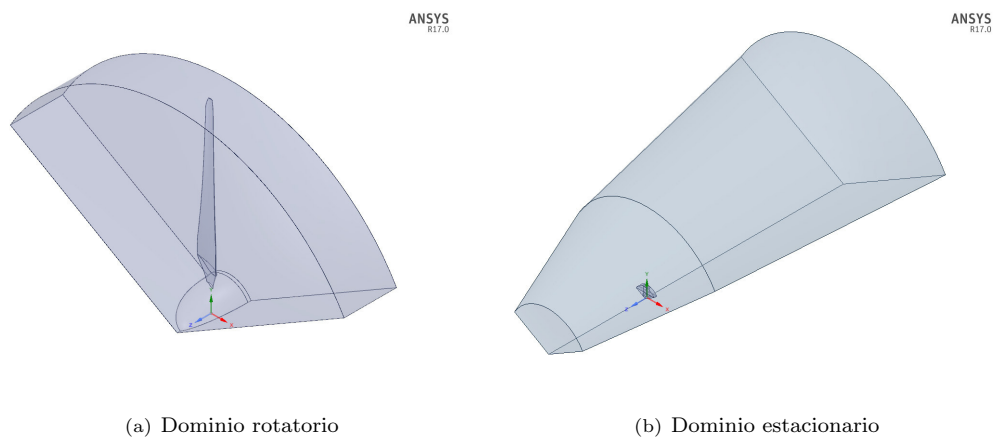


FIGURA 6.4: Dimensión del volumen de control

Indicamos que después de diversos análisis se decidió usar el dominio estacionario tipo *difusor* en vez del tipo *cilíndrico*, esto es debido a que aguas arriba en la parte externa del dominio los valores de la velocidad se mantienen invariantes al realizar la simulación, por tanto se decidió omitir esta zona para ahorrar recurso computacional.

Finalmente a través de las herramientas de revolución y operaciones booleanas obtenemos los volúmenes de control *dominio rotatorio* 6.5(a) y *dominio estacionario* 6.5(b).



(a) Dominio rotatorio

(b) Dominio estacionario

FIGURA 6.5: Volúmenes de control

6.3. Generación de las mallas

De manera análoga a la Sección 4, en este apartado se generaron 4 mallas diferentes para el análisis de la turbina eólica y se definieron las mallas basta, gruesa, media y fina como MT4, MT3, MT2 y MT1 respectivamente. Indicamos que estas mallas son no estructuradas debido a la complejidad de la pala de la turbina eólica. En el dominio rotatorio los elementos utilizados son tetraedros en su mayoría y elementos primásticos fueron empleados en la zona de la capa límite.

Se realizó el cálculo previo para estimar la altura de la primera capa que permita un y^+ aproximado a la unidad donde el valor fue de 5×10^{-6} y se optó a mantener las mallas por debajo de un valor de 0.95 para el skewness.

Debido a la complejidad de discretizar el dominio rotatorio, se dividió en tres subdominios con la finalidad de minimizar los tiempos de mallado y mejorar el control de calidad de la malla. De forma análoga se dividió el dominio estacionario en 3 elementos para facilitar el mallado externo.

En el Cuadro 6.1 se presenta en resumen los parámetros de las 4 mallas descritas.

Resolución Malla	MT4	MT3	MT2	MT1
Número de Nodos	$1.17 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^6$	$2.02 \cdot 10^6$	$3.06 \cdot 10^6$
Número de Elementos	$5.2 \cdot 10^6$	$5.66 \cdot 10^6$	$7.04 \cdot 10^6$	$9.65 \cdot 10^6$
Skewness	0.23	0.25	0.26	0.28
Max Skewness	0.91	0.9	0.91	0.9
Número de capas	5	10	15	20
Altura 1ra capa (m)	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

CUADRO 6.1: Parámetros del domino rotatorio de las mallas MT1, MT2 y MT3

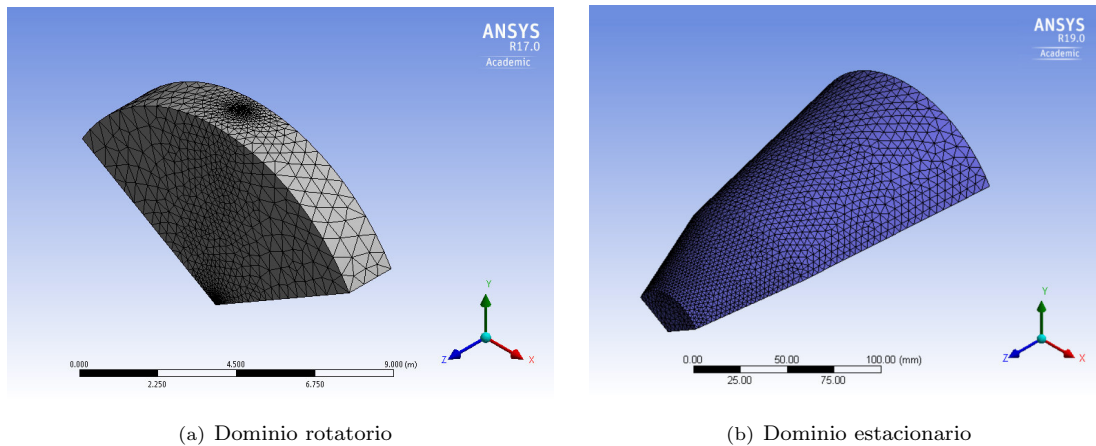


FIGURA 6.6: Mallado de los volúmenes de control

6.4. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para la simulación de la turbina eólica se definen de manera similar que en la Sección 5.3. El modelo de turbulencia seleccionado es el $\kappa - \omega$ SST y las propiedades del aire a 25° C son:

$$\rho = 1.185 \frac{kg}{m^3} \quad \nu = 1.545 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

En la simulación del perfil aerodinámico las variables fueron la velocidad del flujo expresado mediante el número de Reynolds (Re) y el ángulo de ataque del perfil (α). Sin embargo, en esta sección no utilizamos el número de Reynolds. Las variables en esta sección son la velocidad del flujo libre (V) y la velocidad de rotación de la turbina eólica (ω), que representandolos en forma adimensional en la ecuación (6.1) relación conocida como *Tip Speed Ratio* (λ).

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (6.1)$$

Donde :

$$\begin{aligned} V &= 10.5 m/s & V : \text{velocidad del flujo libre} \\ R &= 6m & R : \text{radio de la turbina eólica} \\ \lambda &= f(\lambda) & \text{Tip Speed Ratio} \\ \omega &: \text{velocidad de rotación} \end{aligned}$$

La interacción entre el volumen estacionario y rotatorio es definido mediante la interface *frozen rotor* debido a la velocidad rotacional del volumen rotatorio. Definimos los valores de la velocidad de rotación de la siguiente manera:

$$\omega = [40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180] \text{ RPM}$$

Para $V = 10.5 \text{ m/s}$ y $R = 6 \text{ m}$, tenemos para el TSR (λ):

ω (RPM)	λ
40	2.4
60	3.6
80	4.8
100	6
120	7.2
140	8.4
160	9.6
180	10.8

CUADRO 6.2: Velocidad de rotación - TSR

La presión de referencia y rugosidad de la superficie es análoga a la Sección 5.3, por tanto definimos la presión relativa y la condición de no deslizamiento como:

$$P_{rel} = 0 \quad h_s = 0$$

Debido a la selección de simular un tercio del rotor, la caras que se encuentra a 120° de inclinación se definieron con la condición de periodicidad.

En la Figura 6.7 apreciamos el dominio rotatorio con sus condiciones de frontera las cuales se indican el Cuadro 6.3.

Frontera	Descripción
Tipo dominio	Rotatorio
Fluido	Aire a $25^\circ C$
Modelo de turbulencia	$\kappa - \omega - SST$
Velocidad de rotación	$\omega [rad/s]$
Inlet	Interface rotatoria en la entrada
Outlet	Interface rotatorio en la salida
Opening	Interface rotatorio en la parte superior
Periodic 1-2	Interface periódica superficies laterales
Superficie Turbina	Condicion de no deslizamiento - $h_s = 0$

CUADRO 6.3: Descripción del ordenador

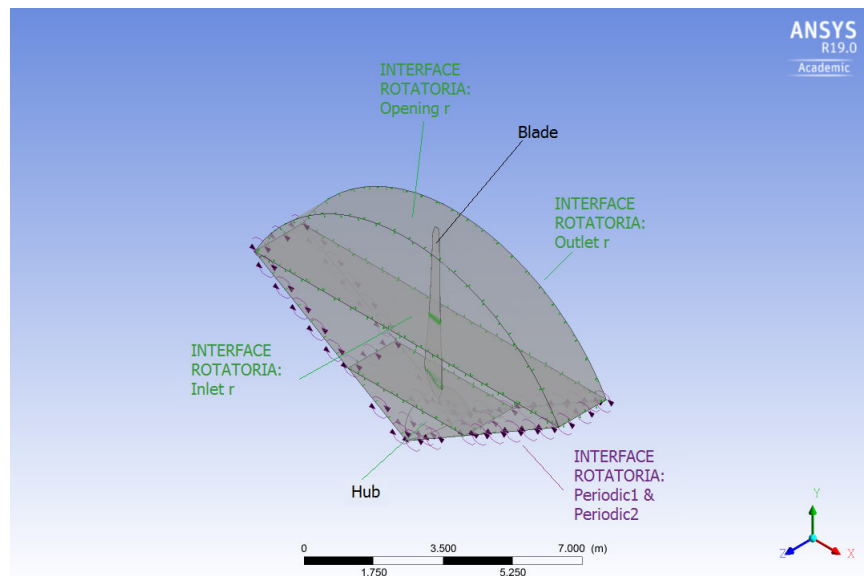


FIGURA 6.7: Condiciones de frontera dominio rotatorio

En el Cuadro 6.4 se definen las condiciones de frontera del dominio estacionario.

Frontera	Descripción
Tipo dominio	Estacionario
Fluido	Aire a 25°C
Modelo de turbulencia	$\kappa - \omega - SST$
Inlet	Velocidad del aire
Outlet	Presión estática promedio Pstat=0
Periodic 1-2	Interface periódica superficies laterales
Opening	Velocidad del aire

CUADRO 6.4: Condiciones de frontera en el dominio estacionario

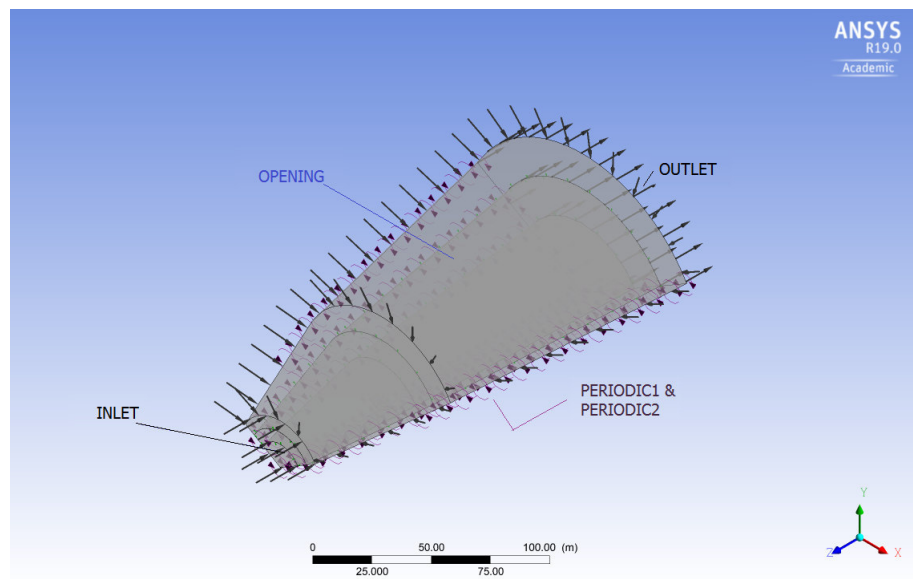


FIGURA 6.8: Condiciones de frontera dominio estacionario

6.5. Convergencia en la simulación

En la simulación de la turbina eólica, a diferencia de la simulación del perfil aerodinámico donde el residual target fue más riguroso debido a la baja complejidad geométrica del perfil en comparación a la turbina eólica, se definió el residuo objetivo en 1×10^{-4} .

Se usaron resultados de simulaciones previas como entrada de inicialización para las simulaciones con mayor cantidad de elementos. Se aprecia en la Figura 6.9 que el residuo de la masa tienden a ser constante a partir de la iteración 40 y que los residuos de momento tienden a ser constantes a partir de la iteración 25,

siendo menores a 4×10^{-4} . Estos valores de residuos son aceptables debido a la complejidad de la turbina eólica.

De igual manera el monitoreo de los imbalances es un buen indicador de la convergencia de la solución y nos indica la conservación de las variables de masa y momento. Como se muestran en las Figuras 6.11 y 6.12 los valores obtenidos son menores al 1 %, el cual es el valor recomendando por la literatura para Ansys CFX.

Finalmente, damos por concluido con la convergencia de la simulación al monitorear parámetros de interés. Entre estos tenemos a la potencia, el empuje y la presión en la pala. Adicional se monitoreó la velocidad en punto para ver como era su comportamiento a lo largo de las simulaciones, tal como se muestra en la Figura 6.13.

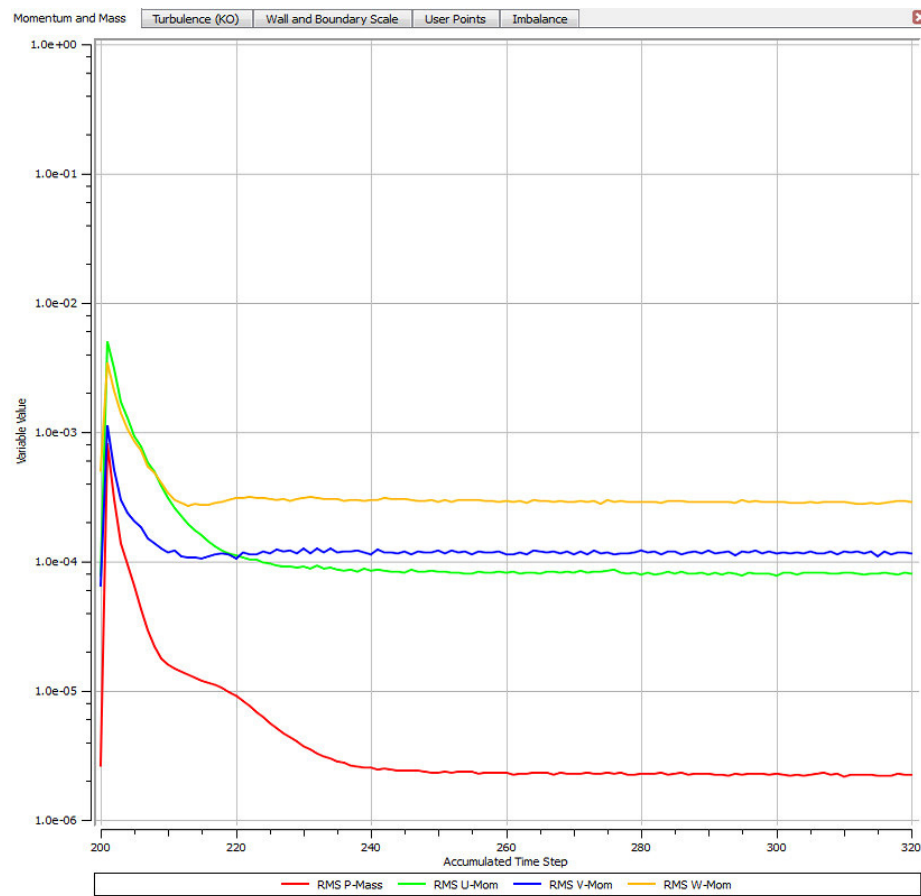


FIGURA 6.9: Residuales de masa y momento

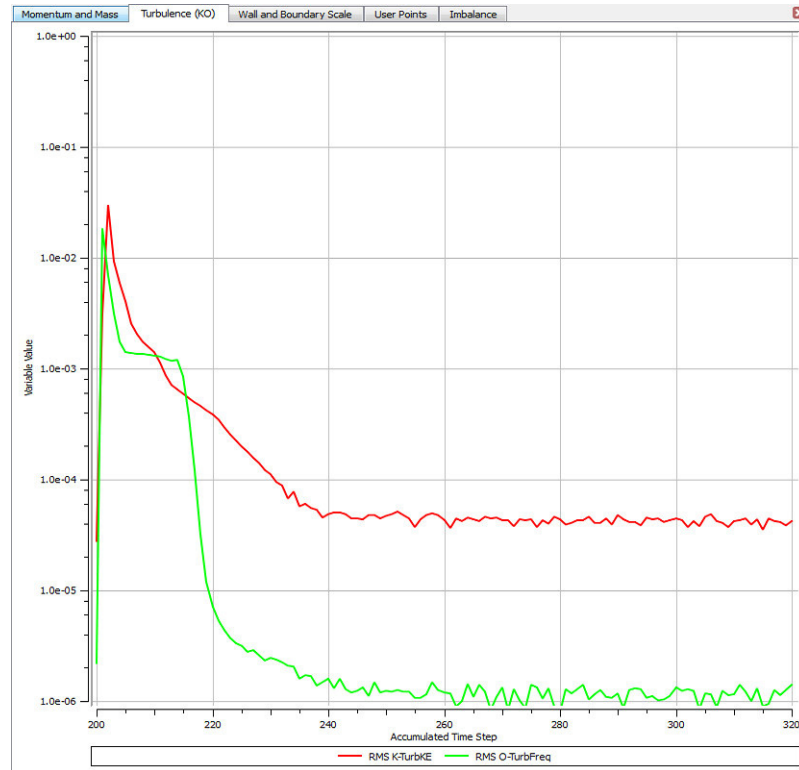


FIGURA 6.10: Residuales de energía cinética turbulenta y tasa de disipación específica

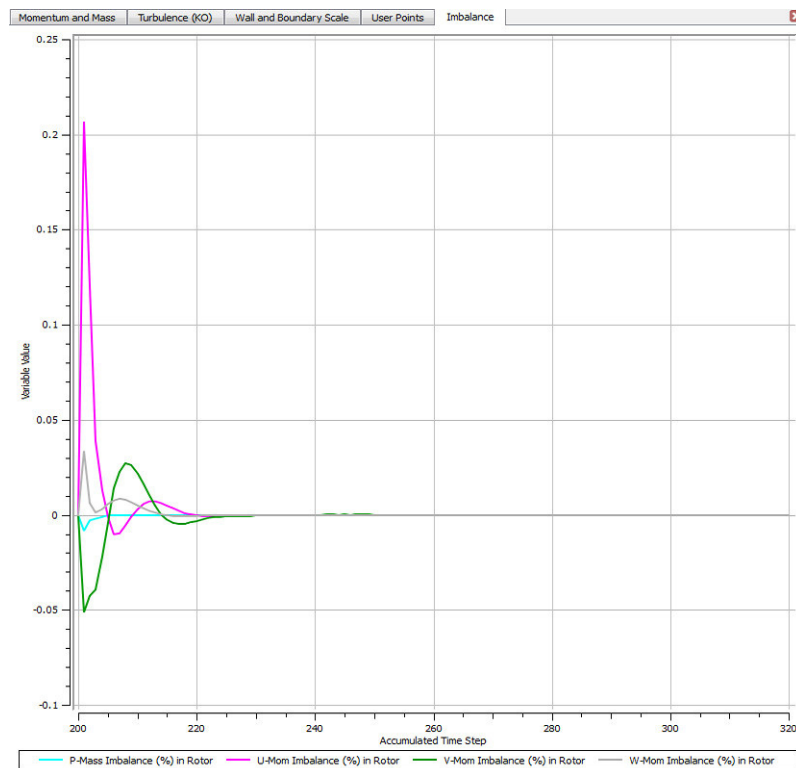


FIGURA 6.11: Imbalance del volumen rotatorio

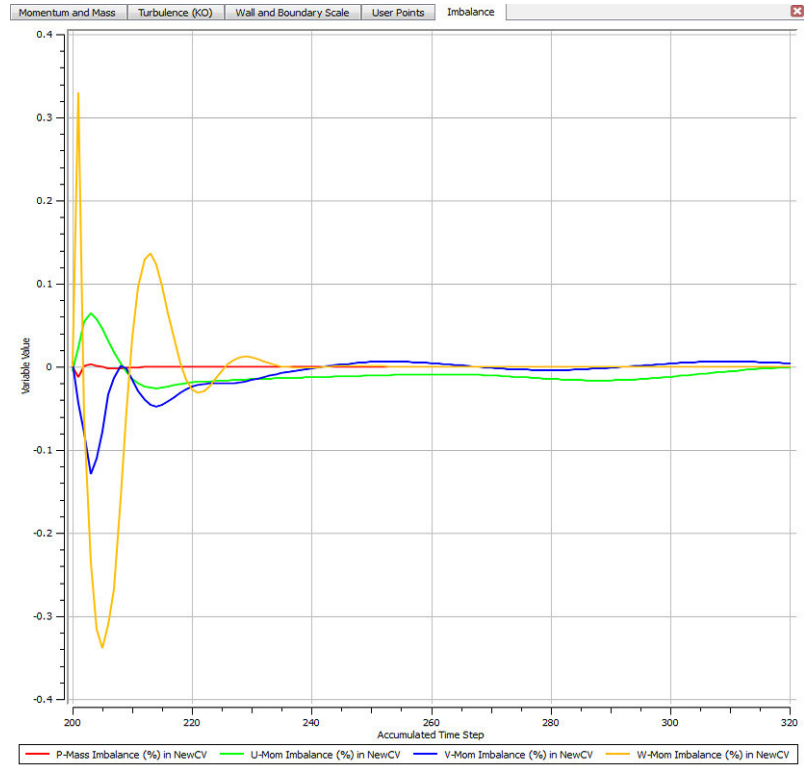


FIGURA 6.12: Imbalance del volumen estacionario

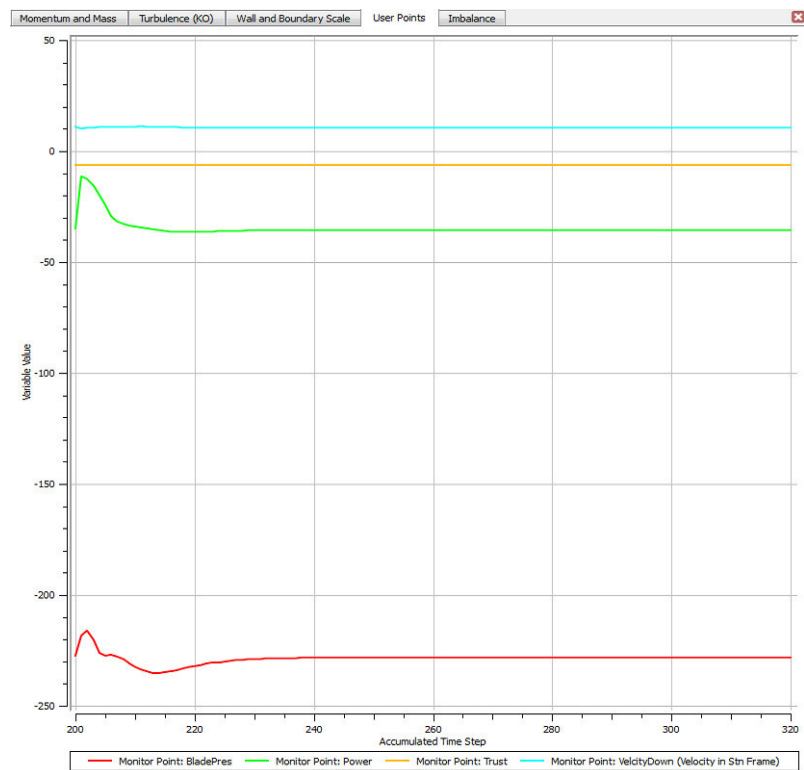


FIGURA 6.13: Monitores: velocidad, empuje, potencia y presión.

6.6. Estudio de independencia de malla

De manera análoga a la Sección 5.5, en esta sección se presenta el estudio de independencia de las mallas MT1, MT2, MT3 y MT4. Las simulaciones para las 3 mallas fueron bajo las condiciones de diseño presentadas en el apartado 4.2, donde la velocidad del flujo deL aire es $V = 10.5 \text{ m/s}$ y la velocidad rotacional es $\omega = 120 \text{ RPM}$.

Los resultados se presentan en el Cuadro 6.5.

Resolución de Malla	MT4	MT3	MT2	MT1
Elementos normalizados	0.54	0.59	0.73	1
P (kW)	26.92	33.04	34.7	35.5
T (kN)	5.84	6.07	6.12	6.12
Y+ prom	0.92	0.71	0.64	0.62
Y+ max	2.15	1.81	1.79	1.79

CUADRO 6.5: Resultados de las mallas MT1, MT2, MT3 y MT4

En la Figura 6.14 se presenta los resultados del $y+$ para las diferentes mallas, donde se observa que los valores promedio son menores a 1 y que los valores máximos se encuentran menor a 2.5. Estos resultados son aceptables acorde a la complejidad de la geometría de la turbina y a recomendaciones del valor del $y+$ ([20], [22]).

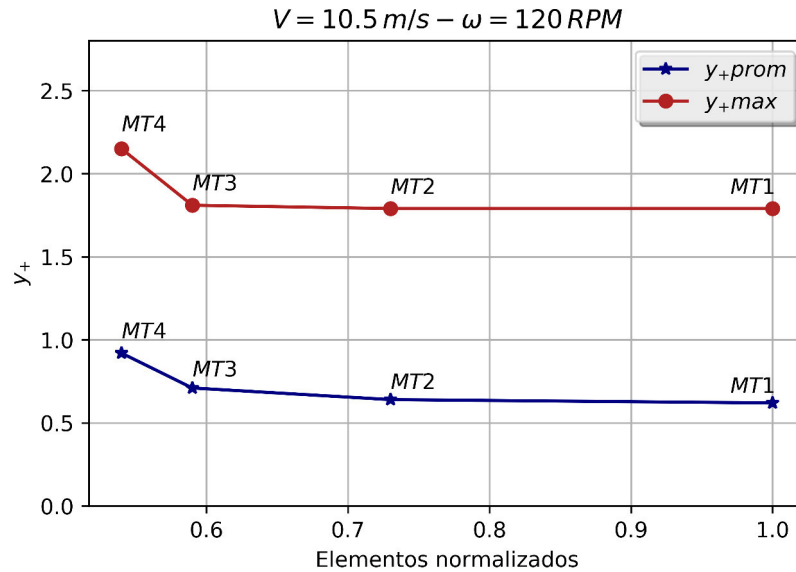


FIGURA 6.14: Resultados del $y+$ respecto a los elementos normalizados

En la Figuras 6.15 y 6.15 se presentan los resultados de la potencia y del empuje con respecto a los elementos normalizados respectivamente. Se observa la tendencia

asintótica de los resultados en ambas figuras y en el Cuadro 6.6 podemos apreciar el error relativo de los resultados

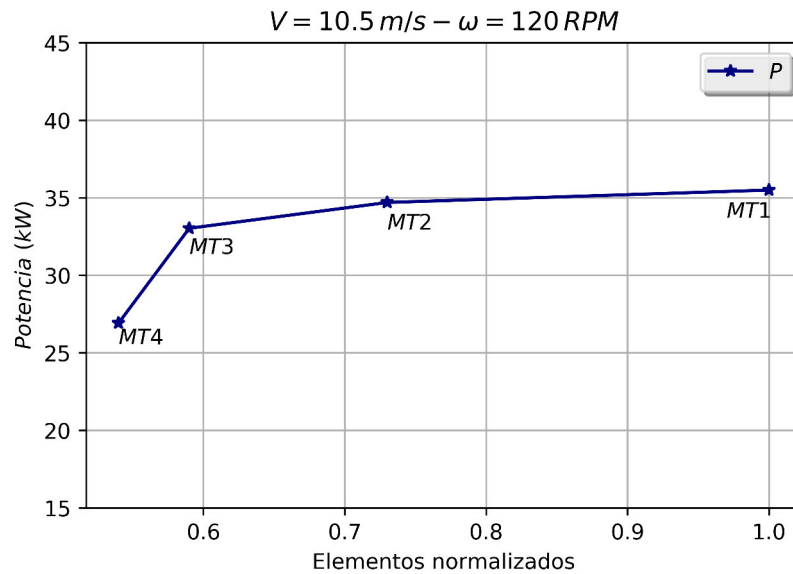


FIGURA 6.15: Resultados de la potencia respecto a los elementos normalizados

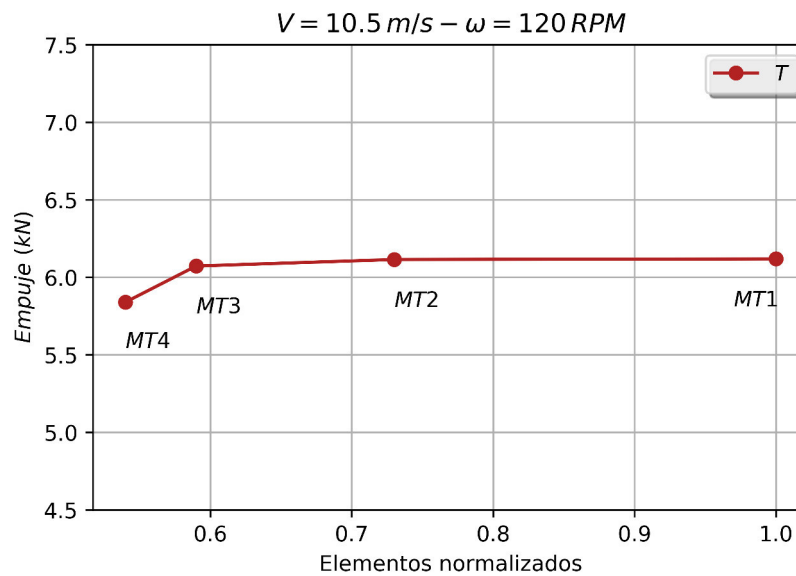


FIGURA 6.16: Resultados del empuje respecto a los elementos normalizados

En el Cuadro 6.6 se muestra el error relativo de los resultados. Tanto como para la potencia y el empuje el error relativo se encuentra menor al 5 % y 1 % a partir de la mallas MT3 a MT2. El menor valor del error relativo se encuentra para las Mallas MT2 a MT1.

Error Relativo Mallas	MT4-MT3	MT3-MT2	MT2-MT1
P	18.5 %	4.8 %	2.25 %
T	3.84 %	0.69 %	0.07 %

CUADRO 6.6: Error relativo entre las mallas MT1, MT2, MT3 y MT4

En la Figura 6.17 se muestra la distribución de presión en las estaciones E3, E8, E13 y E18. Observamos que en la estación E3 (Figura 6.17(a)) se diferencia cualitativamente la presión obtenida de la malla MT4 (5 capas de elementos prismáticos), disminuyendo a lo largo de la longitud de la pala desde la raíz hacia la punta, como en la estación E18 (Figura 6.17(d)). Obseamos que para las demás mallas la distribución de presión presentan alta proximidad entre sí.

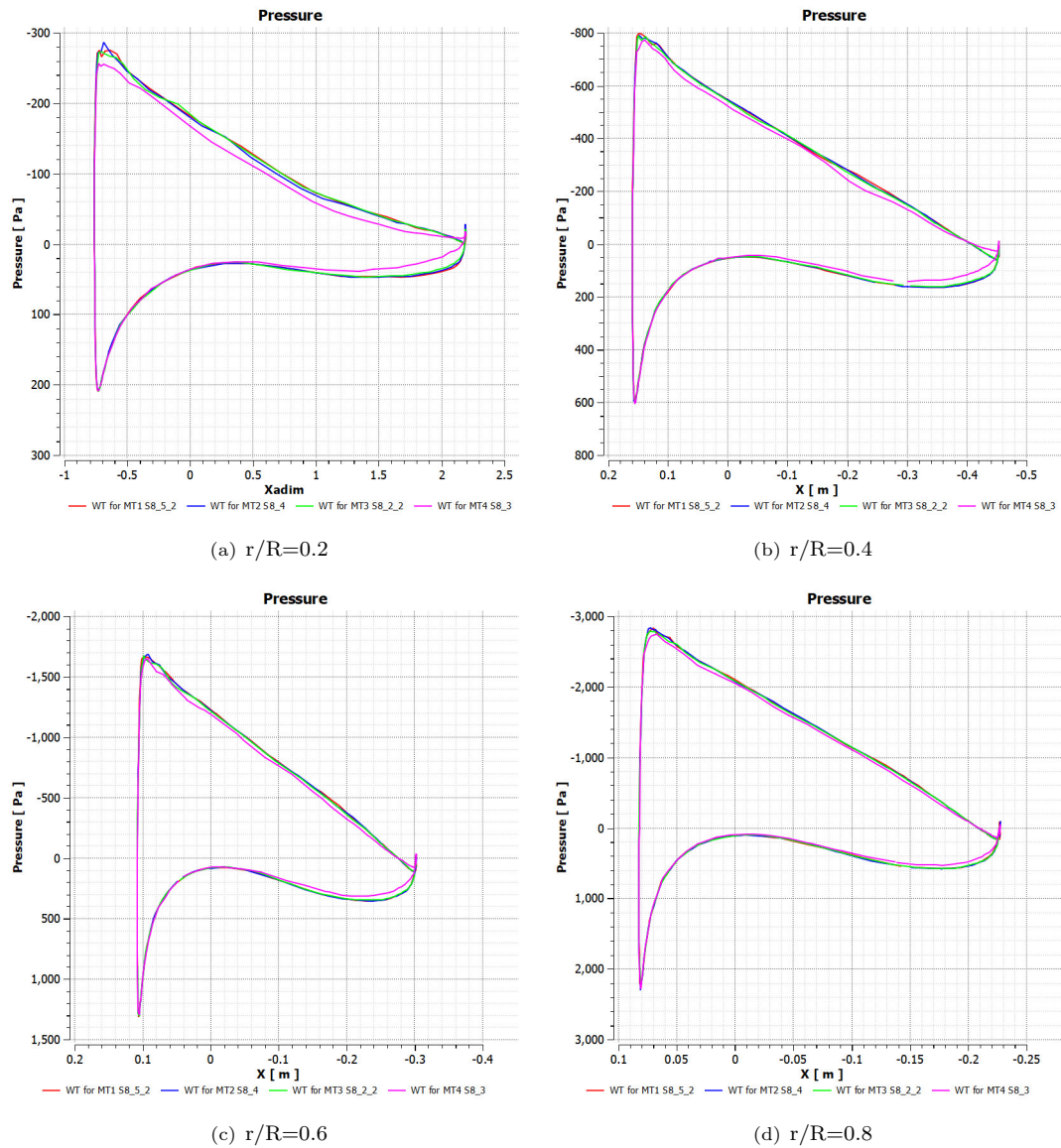


FIGURA 6.17: Distribución de presión

En la Figura 6.18 se muestra la distribución del esfuerzo cortante o fricción en las mismas estaciones descritas para la distribución de presión (E3, E8, E13 y E18). Claramente la resolución del esfuerzo cortante varía para las diferentes mallas, presentando un comportamiento de amortiguamiento al ir aumentando la cantidad de capas en la superficie de la turbina. Esto es debido a que al ir aumentando la cantidad de elementos prismáticos o el número de capas en la superficie permite capturar y/o resolver los efectos debido a la región de la capa límite o en su defecto se disminuye la difusión numérica debido a elementos que no permitan resolver apropiadamente esta región.

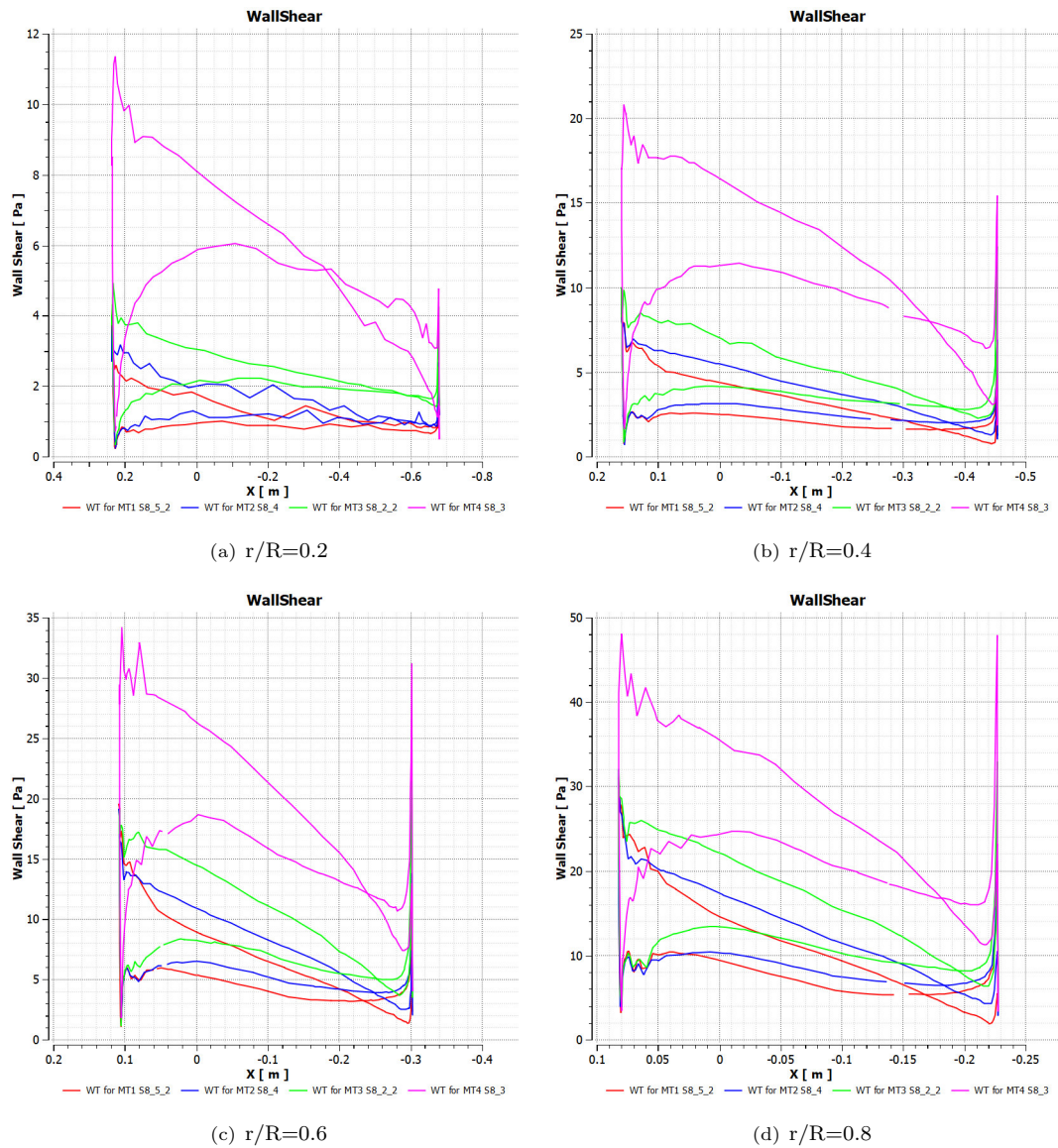
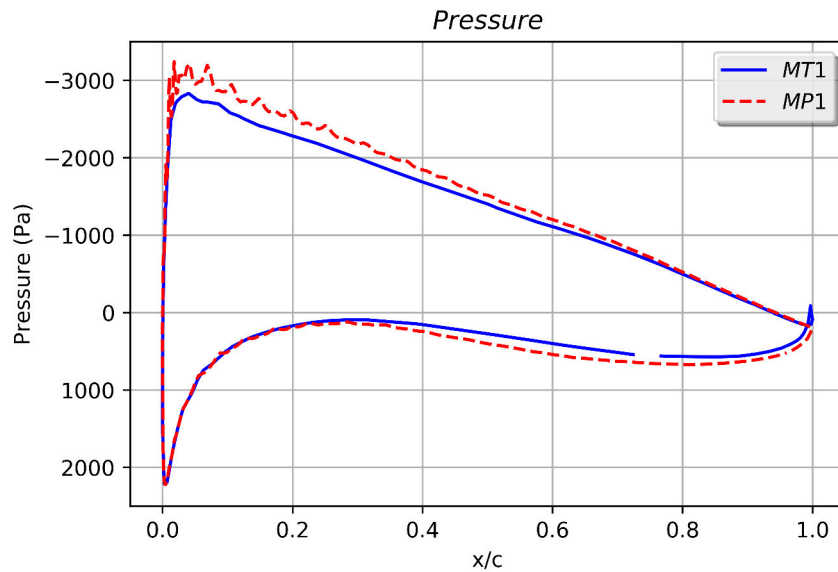


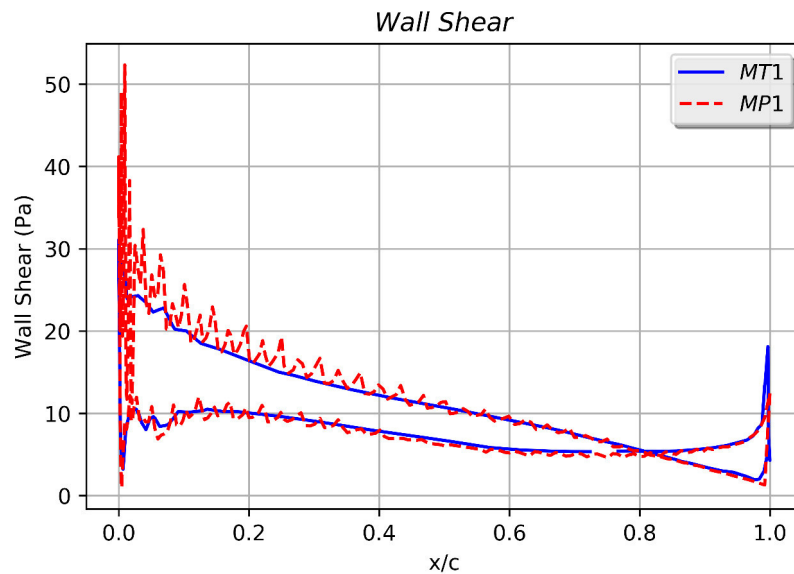
FIGURA 6.18: Distribución de presión

Finalmente, elegimos la malla MT1 debido a que las distribuciones de presión y esfuerzo cortante se aproximan a los resultados del perfil bidimensional MP1, tal como se muestra en la Figura 6.19.

Se precisa que a diferencia del análisis bidimensional del perfil donde sí se desarrolla totalmente la zona de los efectos viscosos en las proximidades de la superficie del perfil debido a una malla altamente estructurada, en el caso de la turbina eólica se ha aproximado el estudio hasta el caso de 20 capas teniendo presente el recurso computacional sin sacrificar la calidad de los resultados.



(a) Distribución presión



(b) Distribución esfuerzo cortante

FIGURA 6.19: Estacion E18 $r/R=0.8$

Capítulo 7

Análisis de los resultados

7.1. Resultados de los coeficientes aerodinámicos

En esta sección presentaremos los resultados de la simulación computacional del perfil Wortmann FX 60-126 descrita en el Capítulo 5 para la malla seleccionada MP1, donde la simulación se realizó mediante el software Ansys CFX empleando el modelo de turbulencia $k - \omega SST$ con un $y+ \leq 1$.

Los resultados obtenidos se representan mediante las curvas de los coeficientes de sustentación, arrastre y momento con respecto al ángulo de ataque como se muestran en las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3 respectivamente.

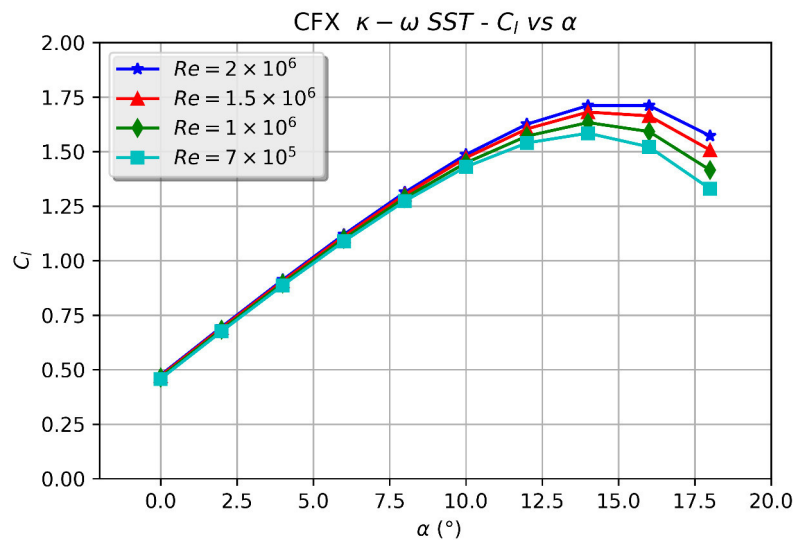
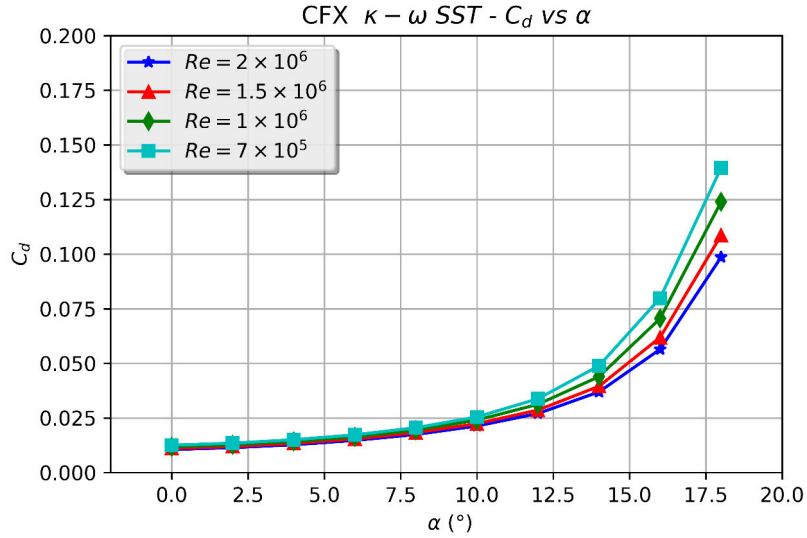
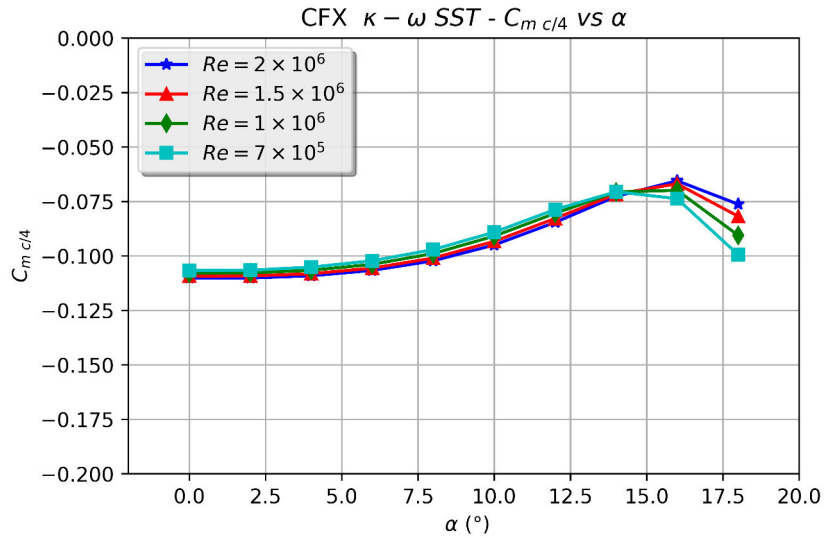


FIGURA 7.1: Resultados C_l vs α

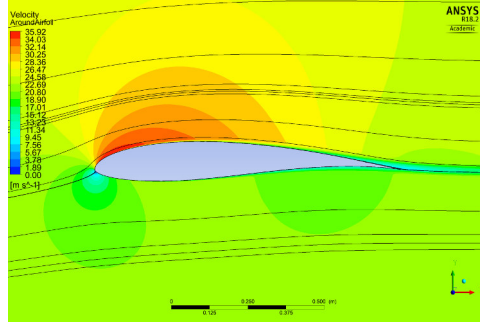
Los resultados de los coeficientes de sustentación y arrastre que se muestran en las Figuras 7.1 y 7.2 se encuentran próximos entre sí para ángulos de ataque menores a 10° . A partir de este ángulo vemos que para $Re = 2 \times 10^6$ se obtienen los mayores valores de sustentación y los menores valores de arrastre.

FIGURA 7.2: Resultados C_d vs α

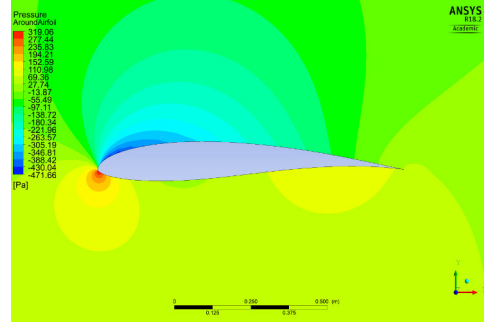
A diferencia de los coeficientes de sustentación y arrastre, los resultados de los coeficientes de momento presentan proximidad hasta ángulos de ataque menores a 14° , tal como se muestra en la Figura 7.3. A partir de este ángulo se incrementa notoriamente la diferencia en los resultados obtenidos.

FIGURA 7.3: Resultados $C_{m\ c/4}$ vs α

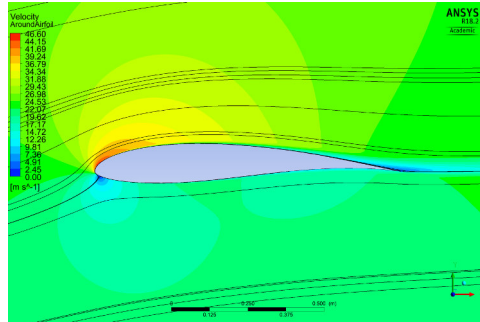
Para el caso donde $Re = 1.5 \times 10^6$, las Figuras 7.4(a), 7.4(c), 7.4(e), 7.4(g) muestran el campo de velocidad y las Figuras 7.4(b), 7.4(d), 7.4(f), 7.4(h) muestran el campo de presión del perfil aerodinámico.



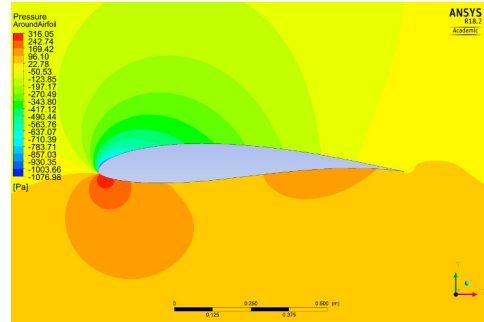
(a) $\alpha = 4^\circ$



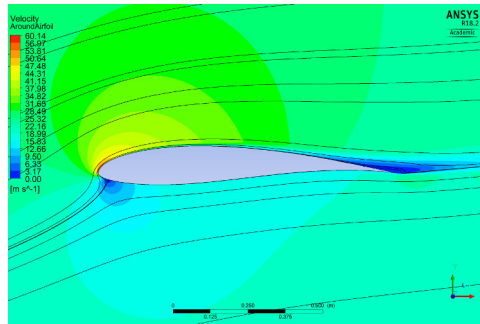
(b) $\alpha = 4^\circ$



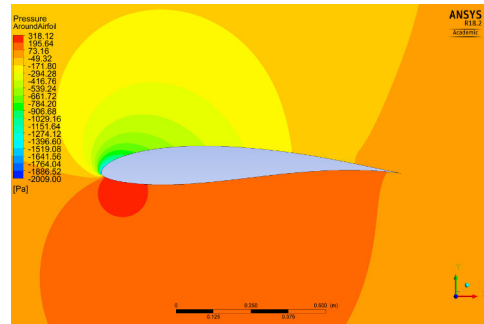
(c) $\alpha = 8^\circ$



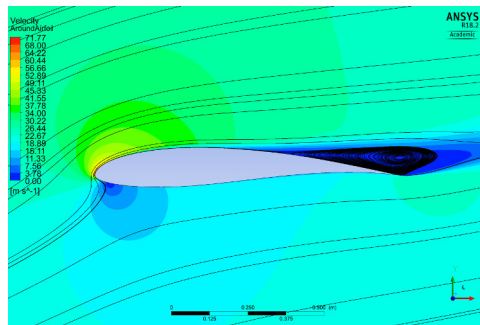
(d) $\alpha = 8^\circ$



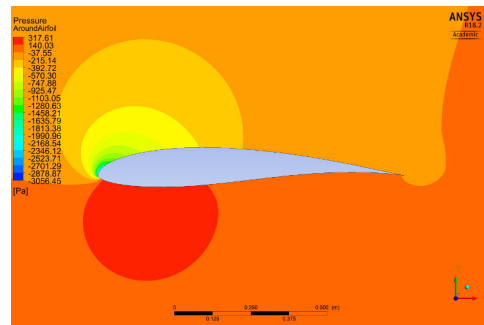
(e) $\alpha = 12^\circ$



(f) $\alpha = 12^\circ$



(g) $\alpha = 16^\circ$



(h) $\alpha = 16^\circ$

FIGURA 7.4: Perfil Wortman FX 60-126 $Re = 1.5 \times 10^6$

Las Figuras 7.5 y 7.6 muestran la distribución de la presión y del esfuerzo cortante respectivamente a lo largo del perfil aerodinámico. Indicamos que se extrajeron los mismos ángulos de ataque de la figura previa, siendo estos para $\alpha = 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$.

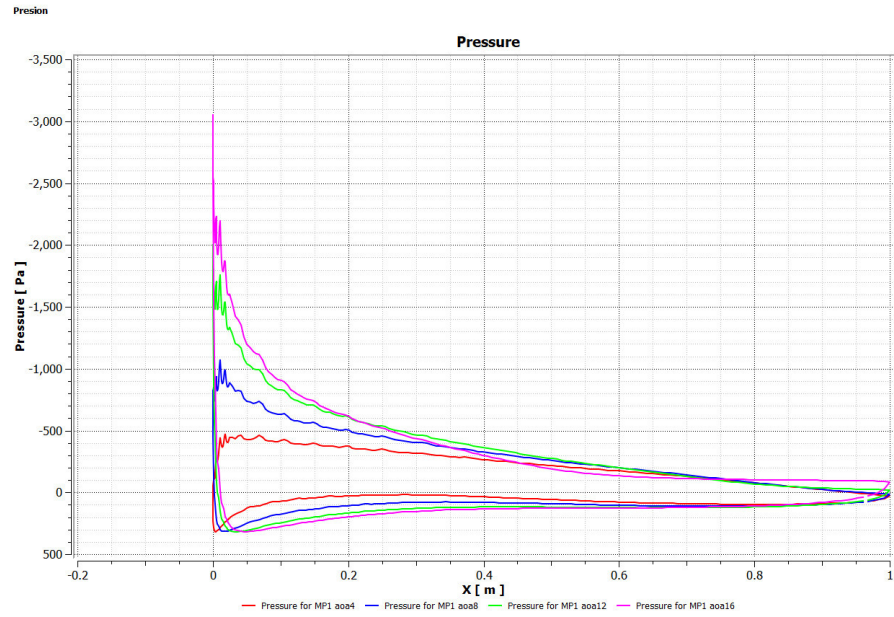


FIGURA 7.5: Presión - $Re = 1.5 \times 10^6$,

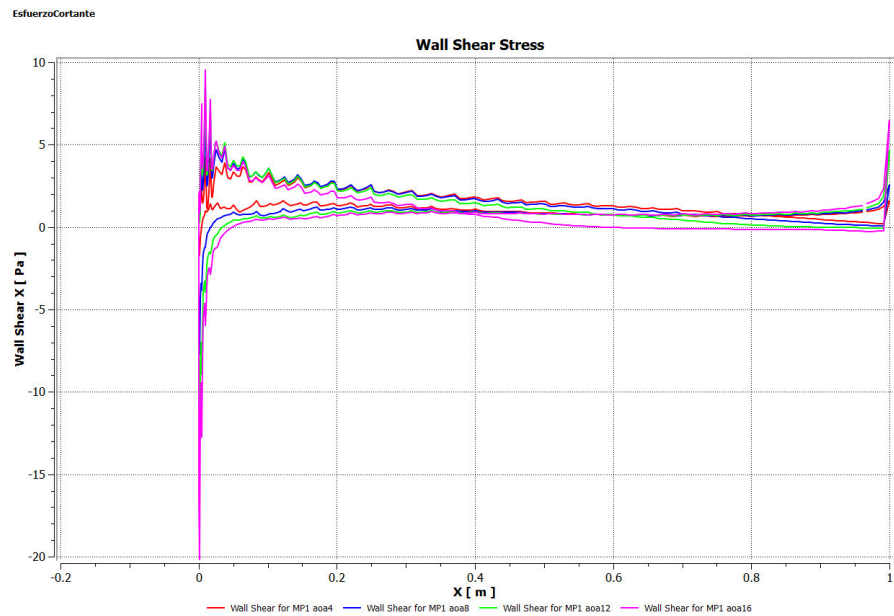


FIGURA 7.6: Esfuerzo cortante - $Re = 1.5 \times 10^6$,

CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se presenta en los Cuadros 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 los coeficientes aerodinámicos obtenidos mediante el Ansys-CFX para los números de Reynolds $Re=[7.0E05, 1.0E06, 1.5E06, 2.0E06]$.

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
0	0.46	0.01252
2	0.68	0.01344
4	0.89	0.01501
6	1.09	0.01725
8	1.27	0.0205
10	1.43	0.02543
12	1.54	0.03375
14	1.58	0.04885
16	1.52	0.07976
18	1.33	0.1395

CUADRO 7.1: $Re = 7.0E05$ CFX

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
0	0.46	0.0118
2	0.68	0.0127
4	0.9	0.0142
6	1.1	0.0163
8	1.29	0.0194
10	1.45	0.024
12	1.57	0.0312
14	1.63	0.0439
16	1.59	0.0705
18	1.42	0.1239

CUADRO 7.2: $Re = 1.0E06$ CFX

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
0	0.47	0.011
2	0.69	0.01189
4	0.91	0.01332
6	1.11	0.01534
8	1.3	0.01825
10	1.47	0.02235
12	1.6	0.0286
14	1.68	0.03948
16	1.66	0.06181
18	1.51	0.10864

CUADRO 7.3: $Re = 1.5E06$ CFX

$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d
0	0.47	0.0105
2	0.7	0.0114
4	0.91	0.0127
6	1.12	0.0147
8	1.31	0.0174
10	1.49	0.0213
12	1.63	0.027
14	1.71	0.0369
16	1.71	0.0564
18	1.57	0.0986

CUADRO 7.4: $Re = 2.0E06$ CFX

7.2. Resultados de los parámetros de la turbina eólica

7.2.1. Resultados modelo de BEM

De acuerdo a la Sección 4.5 donde se validó el modelo de BEM, obtuvimos los resultados de potencia, empuje y sus respectivos coeficientes para los casos de estudio de las turbinas eólicas OPT NACA 4418 y 4412 descritos en la Sección 4.5.1 y 4.5.2.

En esta sección, mostraremos los resultados obtenidos del modelo de BEM aplicado a la turbina eólica *Waira 12* descrita en la Sección 4.2. Los coeficientes aerodinámicos necesarios para el código son los provenientes del Profilkatalog I y del Xfoil descritos en la Sección 3.2 y los obtenidos en la simulación del perfil realizado en el Capítulo 5.

En los Cuadros 7.5, 7.5 y 7.7 se presetan los resultados obtenidos mediante el modelo de BEM. Al igual que en la Sección 4.5, los valores de estos resultados se realizaron mediante los métodos de Hansen [2] y Wood [8], con la finalidad de poder contrastar los valores finales y afianzar la validación del modelo.

<i>Data Profilkatalog I</i>	C_P	C_T	$P(kW)$	$T(kN)$
Hansen's Theory	0.472	0.922	36.6	6.8
Wood's Theory	0.476	0.944	37	7

CUADRO 7.5: HAWT Waira 12 - Data exp. Profilkatalog I

<i>Data Xfoil</i>	C_P	C_T	$P(kW)$	$T(kN)$
Hansen's Theory	0.465	0.897	36.1	6.6
Wood's Theory	0.469	0.917	36.4	6.8

CUADRO 7.6: HAWT Waira 12 - Data Xfoil Ncrit=1 (1.966 % turb level)

<i>CFX SST</i>	C_P	C_T	$P(kW)$	$T(kN)$
Hansen's Theory	0.456	0.88	35.3	6.5
Wood's Theory	0.459	0.899	35.6	6.6

CUADRO 7.7: HAWT Waira 12 - CFX SST

La proximidad de los resultados se puede apreciar en las Figuras 7.7 y 7.8, donde la diferencia de los valores no exceden en más del 5 % con respecto al obtenido mediante los coeficientes experimentales.

Se aprecia claramente que los coeficientes obtenidos mediante la simulación computacional del perfil Wortmann FX 60-126 arrojan los menores valores de coeficiente de potencia y empuje.

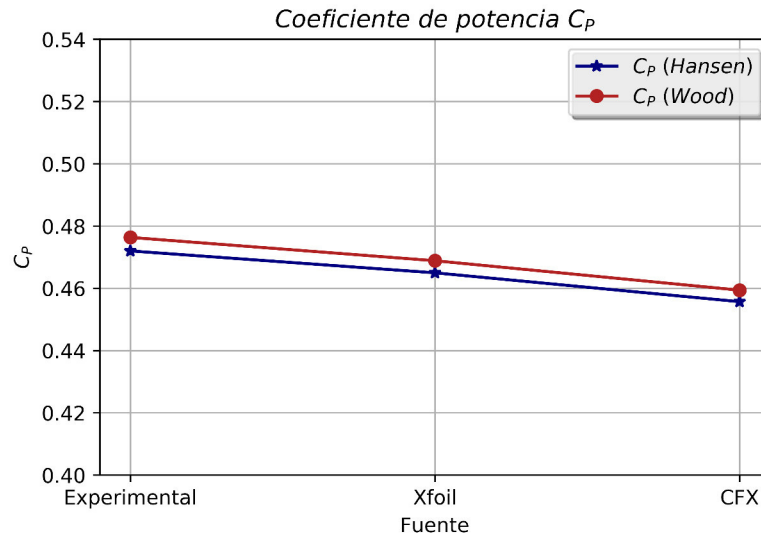


FIGURA 7.7: Resultados coeficiente de potencia

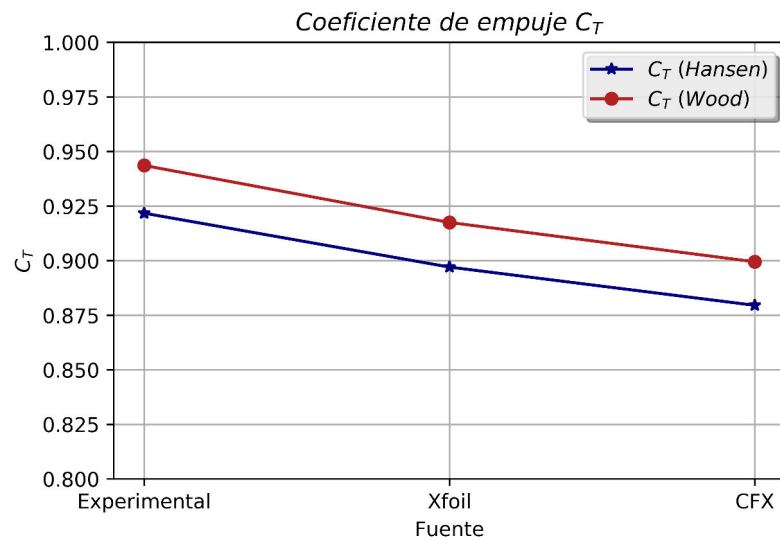


FIGURA 7.8: Resultados coeficiente de empuje

La convergencia del modelo de BEM se logra cuando el coeficiente de inducción axial se estabiliza luego de cierto número de iteraciones, donde la diferencia del valor actual con el previo están por debajo de un criterio de convergencia. Para la estación 3 de la turbina eólica se presentan los valores del coeficiente axial respecto al número de iteraciones, donde se visualiza la convergencia en la Figura 7.9.

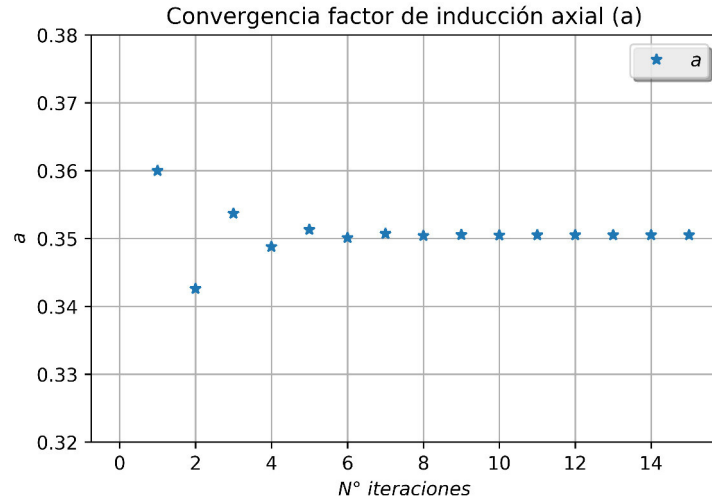


FIGURA 7.9: Valores del coeficiente de inducción axial - Estación 3

Finalmente, en la Figura 7.10 se muestran los factores de inducción axial y tangencial respecto al radio de la pala en forma adimensional (r/R). Los valores obtenidos del factor de inducción axial son menores a 0.4 en el 80 % de la pala, que cumple con la recomendación descrita en Hansen [2]. En el caso donde los valores son mayores a 0.5, estos describen un posible comportamiento de generación de vorticidades en la punta de la pala debido a que en el modelo unidireccional del rotor ideal la velocidad axial que atraviesa al rotor se volvería cero y luego pasaría a ser negativa cambiando el sentido de flujo. En el caso del factor de inducción tangencial, estos describen correctamente la distribución de velocidad inducida debido a la rotación tendiendo a cero al ser mayor la velocidad rotacional en la punta de la pala.

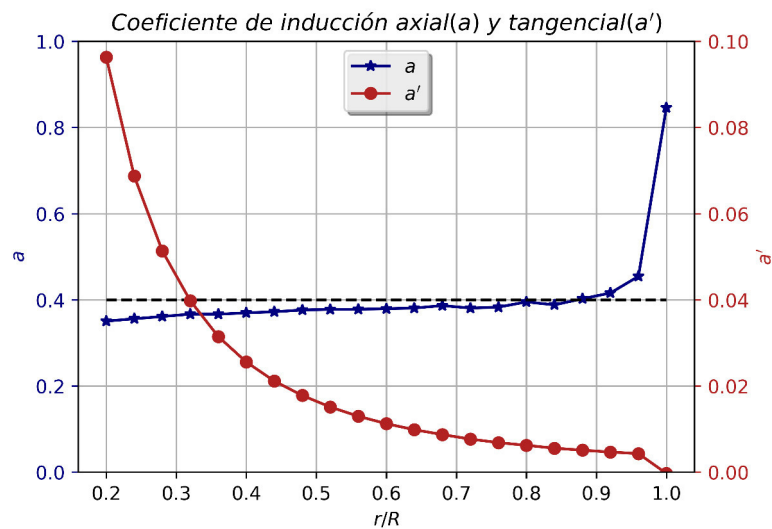


FIGURA 7.10: Resultados coeficientes de inducción axial y tangencial

7.2.2. Resultados simulación computacional

Los resultados de la simulación computacional de la turbina eólica que se presentan en esta sección son los obtenidos de la malla MT1, la cual se describió su proceso de selección en la Sección 6.6. La simulación se realizó bajo las condiciones nominales y de frontera descritas en la Tabla 4.1 y en la Sección 6.4 respectivamente.

Los condiciones nominales de la turbina eólica son de velocidad $V = 10.5, m/s$ y $\omega = 120, RPM$.

Se extrajeron los resultados de la turbina eólica tales como el torque, la potencia y el empuje, con sus respectivos coeficientes adimensionales, los cuales se muestra en la Tabla 7.8.

<i>Turbina eólica</i>	C_P	C_T	$P(kW)$	$T(kN)$
Waira 12	0.458	0.828	35.6	6.1

CUADRO 7.8: Resultados Turbina Eólica - Malla MT1

En la Figura 7.11 y 7.12 podemos apreciar las líneas de corriente en la parte rotatoria y en la parte estacionaria.

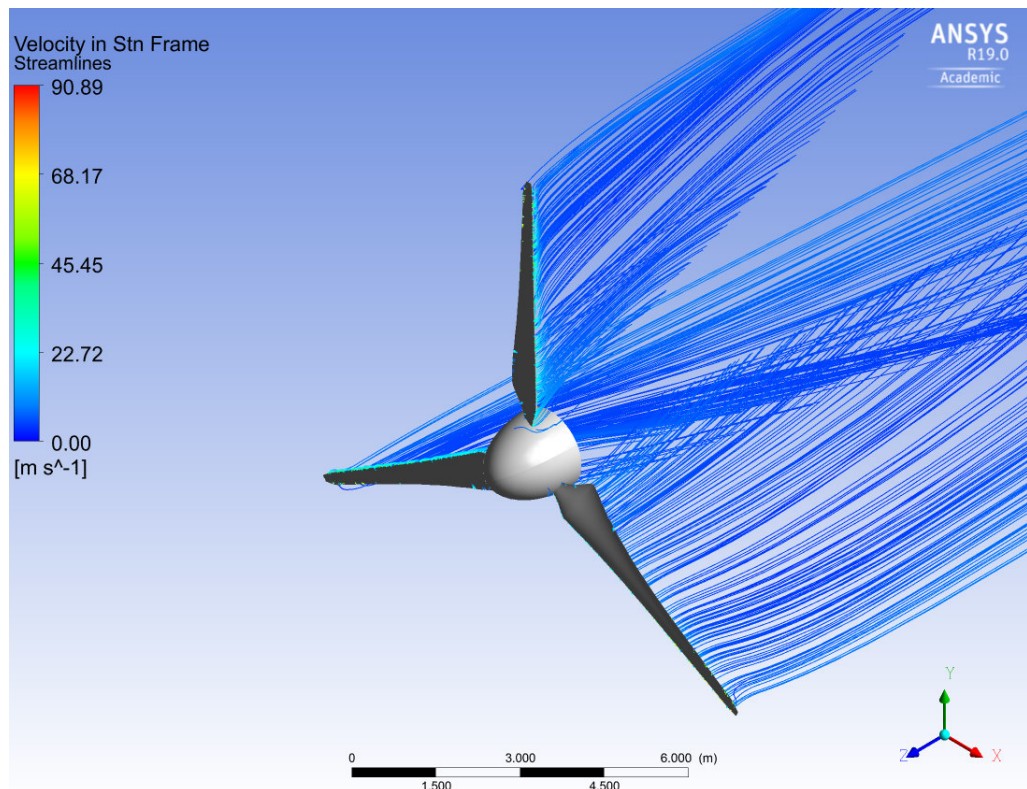


FIGURA 7.11: Líneas de corriente de la turbina eólica - Vista Isométrica

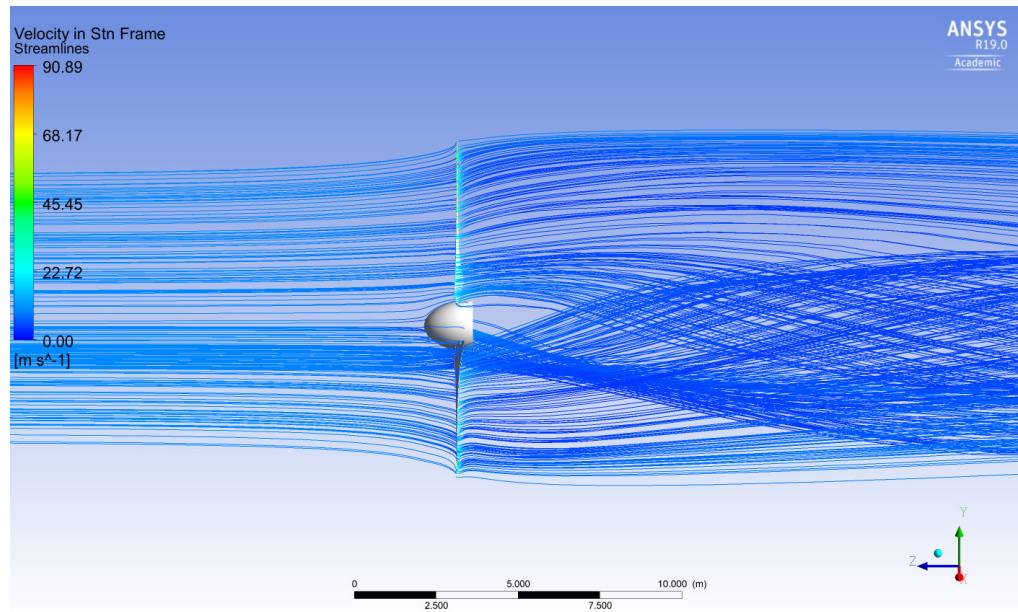


FIGURA 7.12: Líneas de corriente de la turbina eólica - Vista Lateral

En la Figura 7.13(a) corroboramos que la velocidad en la punta de la pala (V_{tip}) en la simulación computacional es el valor esperado para el λ de diseño ($V_{tip} = 75.4 \text{ m/s}$). Mientras que en la Figura 7.13(b) vemos la distribución del valor del y_+ el cual resulta ser menor a dos en toda la pala.

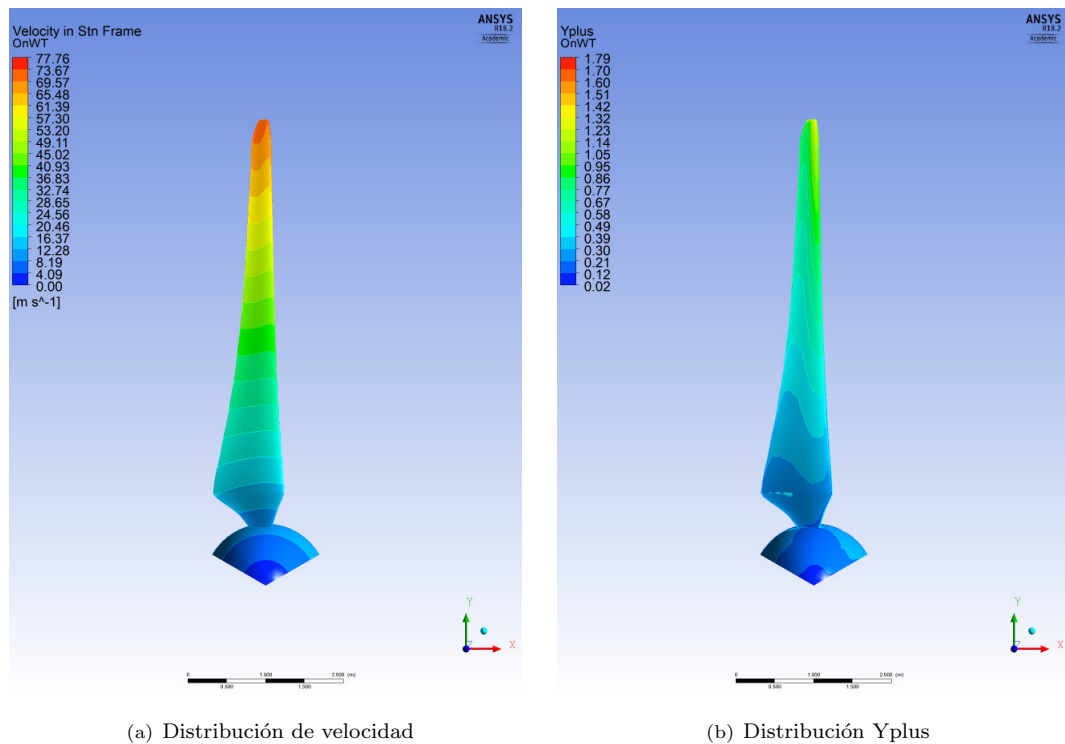


FIGURA 7.13: Distribución en la pala de la turbina eólica

Podemos ver la distribución de la presión y del esfuerzo cortante en la superficie frontal y posterior de la pala en las Figuras 7.14 y 7.15.

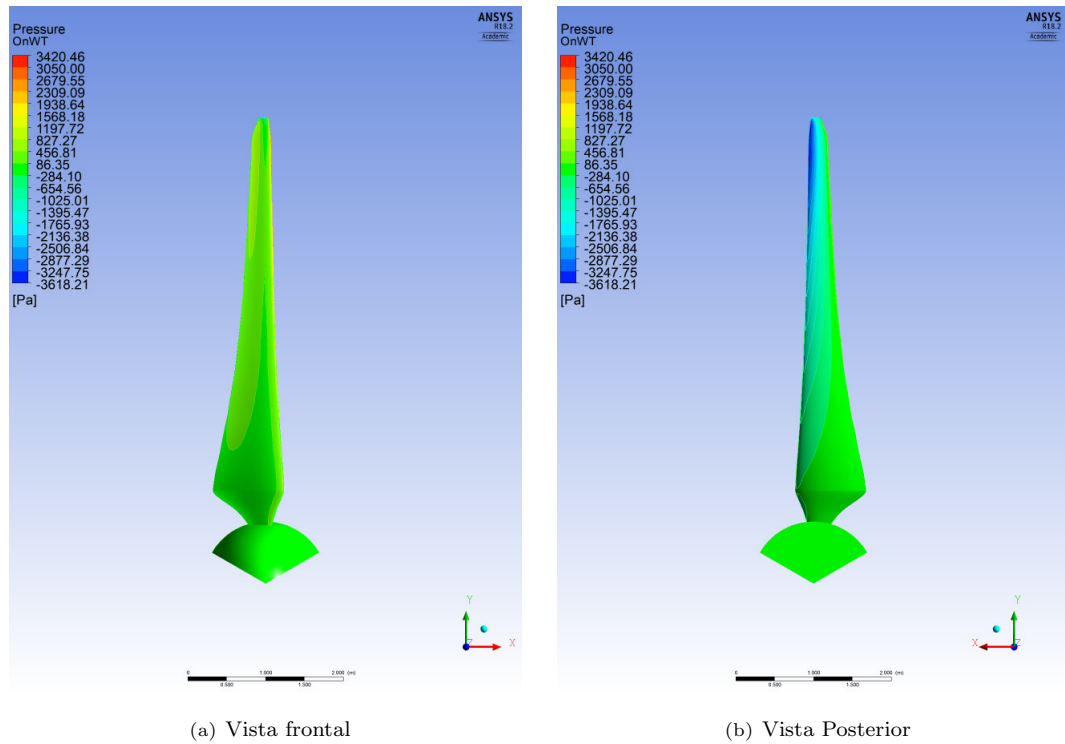


FIGURA 7.14: Distribución de la presión en la pala

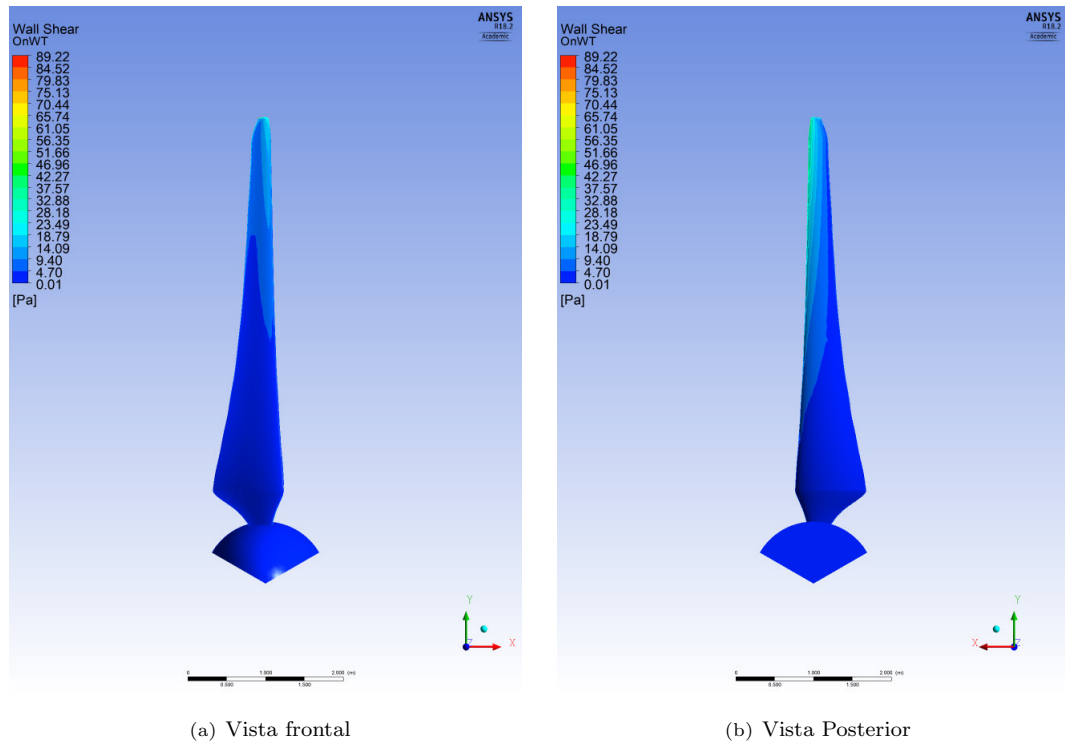


FIGURA 7.15: Distribución del esfuerzo cortante en la pala

La distribución del campo de presión se visualiza en la Figura 7.16. Apreciamos que en las zonas cercanas al rotor la presión es mayor aguas arriba y es menor aguas abajo. En la Figura 7.17 se muestra la distribución de la velocidad y la zona de desarrollo de la estela, apreciamos que después de una longitud aguas abajo la velocidad se va restituyendo a la inicial de entrada.

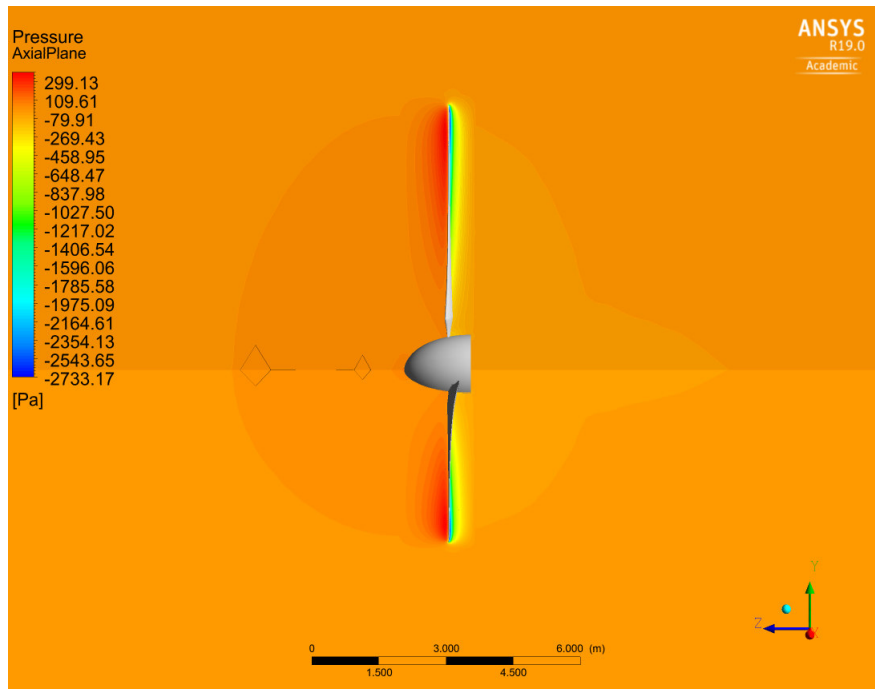


FIGURA 7.16: Distribución del campo de presión

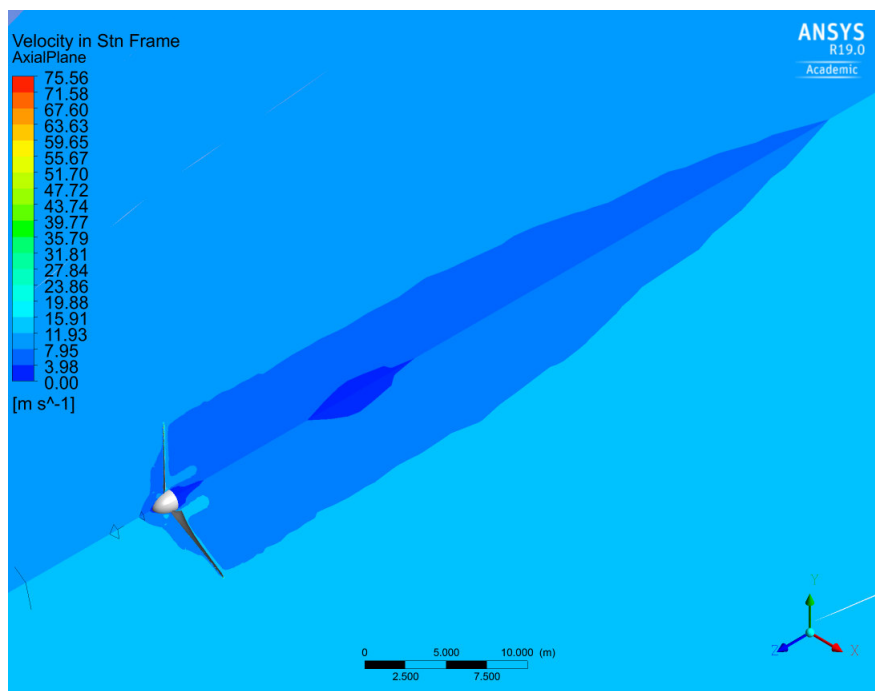
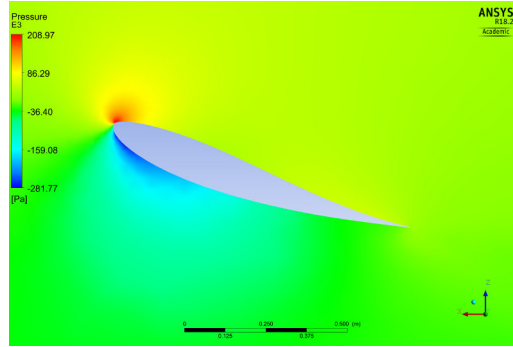
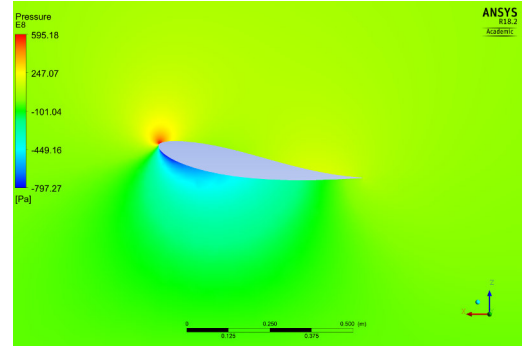


FIGURA 7.17: Distribución del campo de velocidad

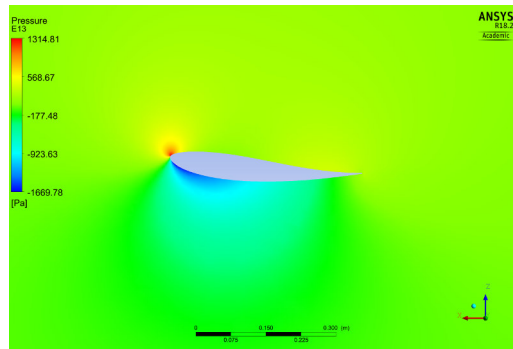
En la Figura 7.18 podemos apreciar la distribución del campo de presión alrededor de las estaciones E3, E8, E13, E18 y E23. Vemos que la diferencia de presión se va incrementando siendo menor en la raíz (Figura 7.18(a)) y mayor en la punta de la pala (Figura 7.18(e)). En esta última estación apreciamos que en el borde de fuga se desarrolla una caída de presión de mayor magnitud.



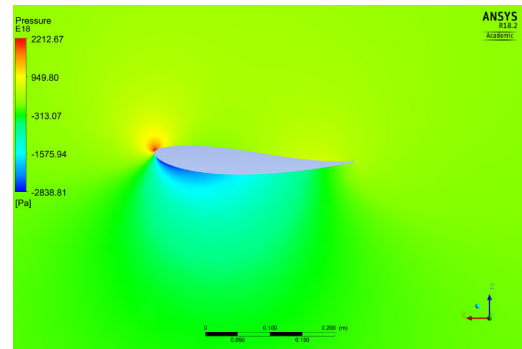
(a) E3 - $r/R=20\%$



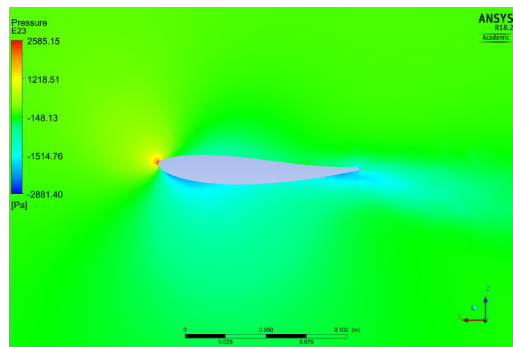
(b) E8 - $r/R=40\%$



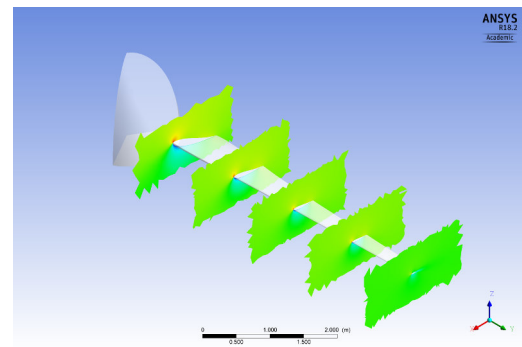
(c) E13 - $r/R=60\%$



(d) E18 - $r/R=80\%$



(e) E23 - $r/R=100\%$



(f) Estaciones

FIGURA 7.18: Campo de presiones a lo largo de pala

A su vez, en la Figura 7.19, vemos la distribución de la velocidad alrededor de las mismas estaciones descritas previamente. Observamos un buen comportamiento del flujo alrededor de la estaciones en la mayor parte de la pala. Sin embargo, en la punta de la pala (E23) vemos una desviación de las líneas de corriente en el borde de fuga con respecto al ángulo de salida tal como se muestra en la Figura 7.19(e).

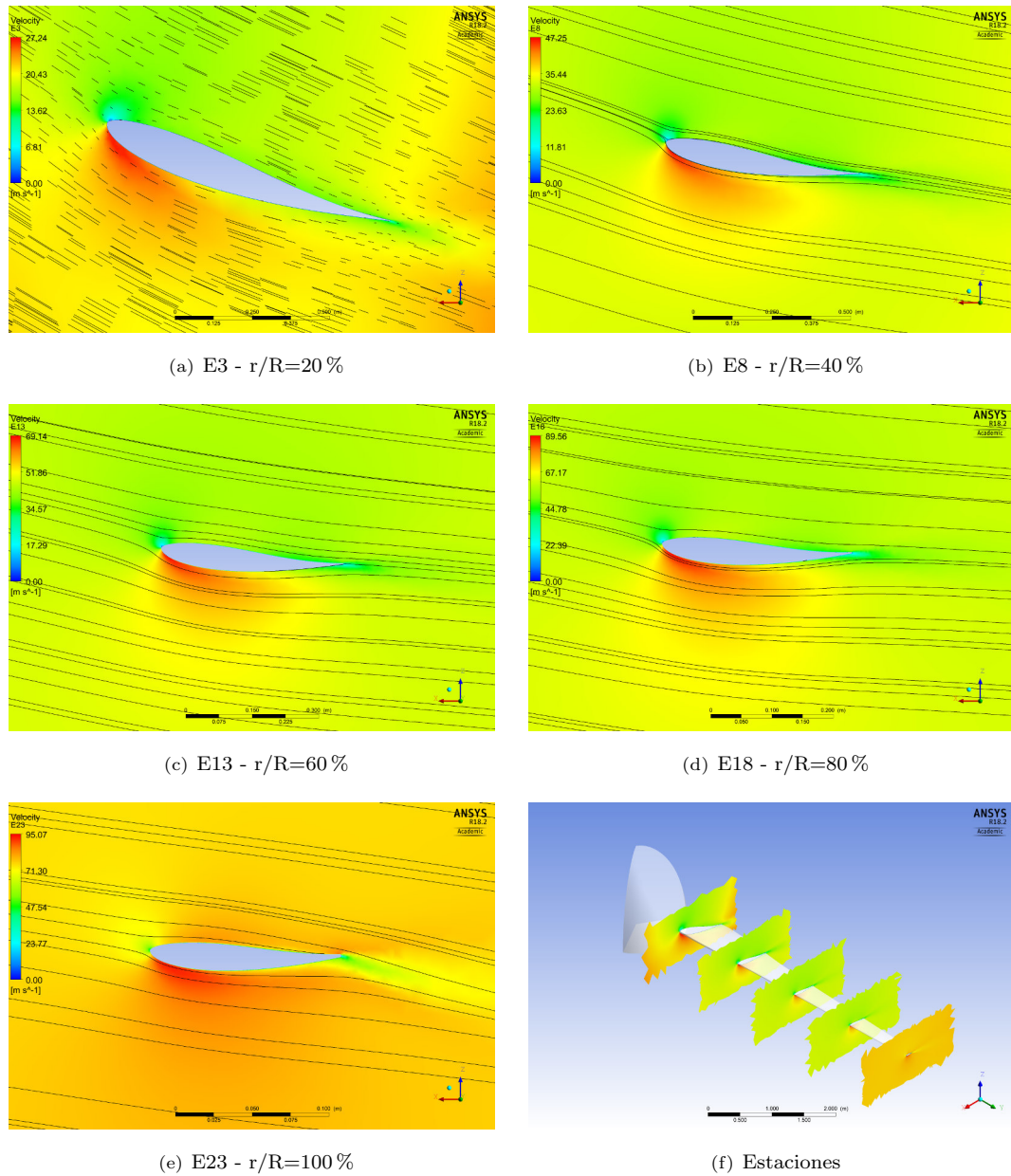


FIGURA 7.19: Campo de velocidad a lo largo de la pala

7.3. Validación de los coeficientes aerodinámicos

En esta sección se presenta la validación de los coeficientes aerodinámicos. Para ello se elaboraron gráficas comparativas de todas las fuentes desarrolladas. Los coeficientes aerodinámicos disponibles son provenientes del Profilkatalog I [25], Xfoil y finalmente de los resultados de la simulación del perfil aerodinámico Sección 7.1.

En las Figuras 7.20 y 7.21 se presentan los resultados para $Re = 2 \times 10^6$. Vemos que los coeficientes de sustentación presentan alta proximidad en los resultados hasta un ángulo de 8° , donde los resultados del Xfoil apartir de este ángulo sobrestiman los experimentales, mientras que los resultados computacional guardan proximidad hasta ángulos de 12° aproximadamente. A partir de este punto vemos como los resultados computacionales no reflejan los experimentales. Para el caso de los coeficientes de arrastre la proximidad es mayor entre los resultados del Xfoil y los experimentales. Los resultados computacionales son sobreestimados tal como se muestra en la Figura 7.21.

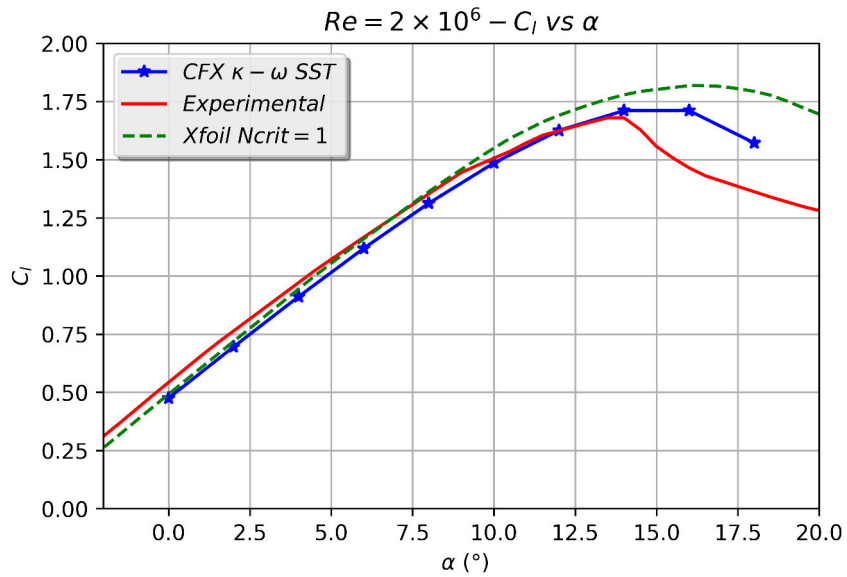
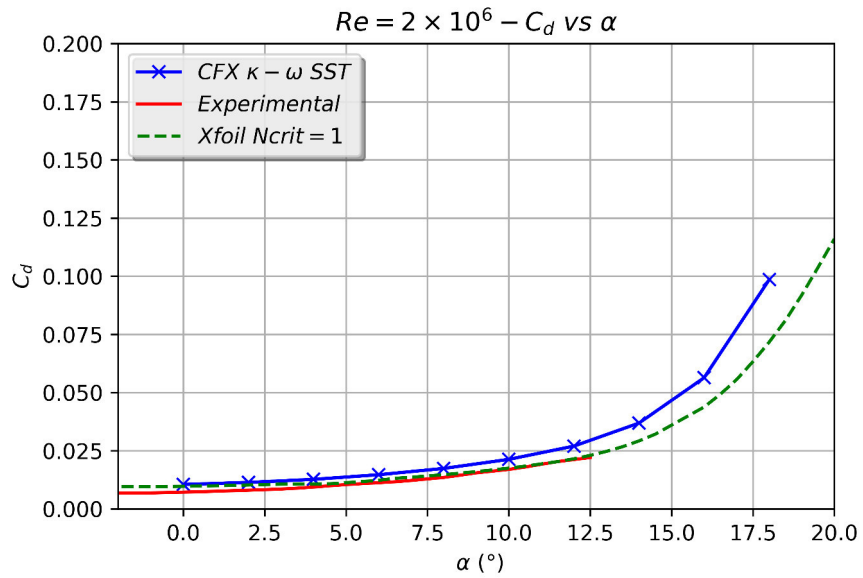
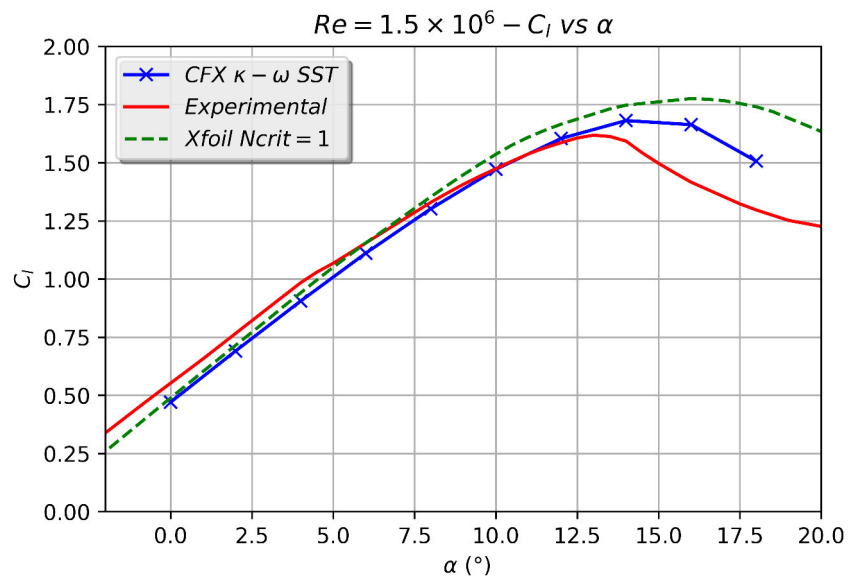
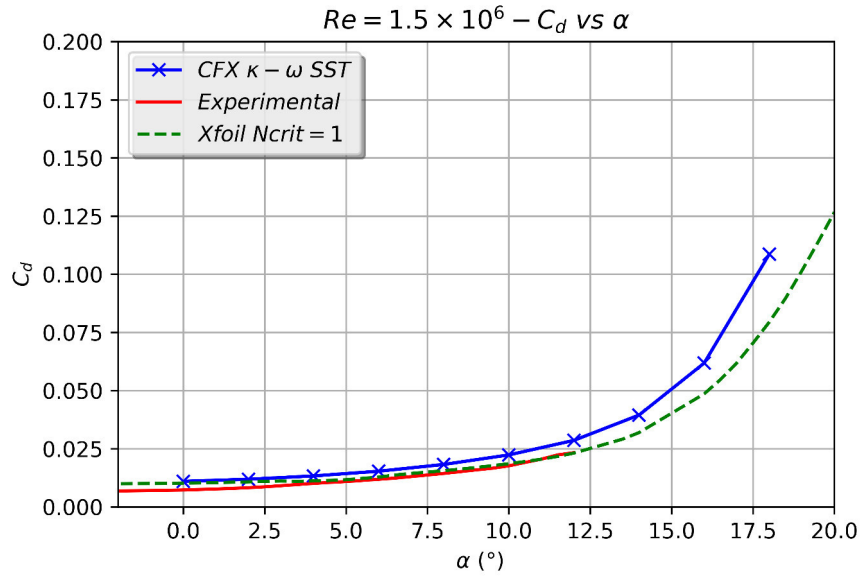


FIGURA 7.20: Coeficientes de sustentación $Re = 2 \times 10^6$

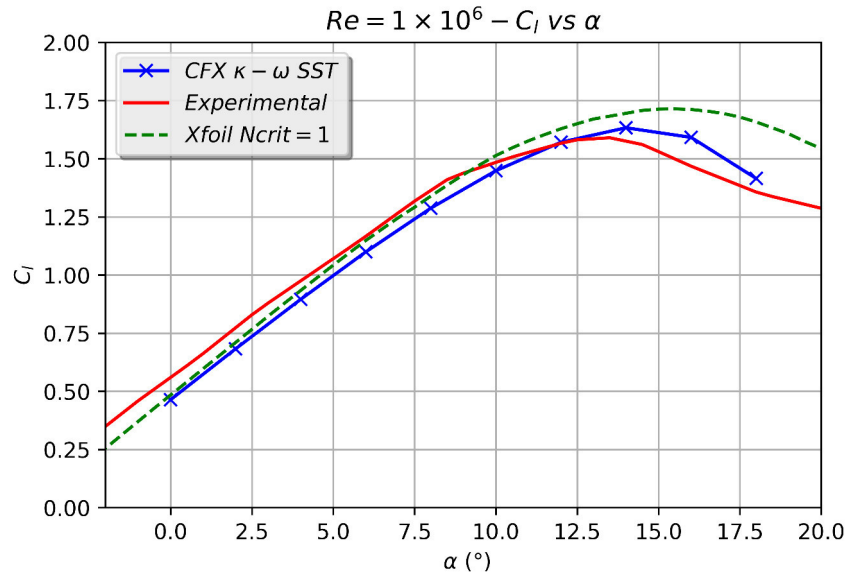
FIGURA 7.21: Coeficientes de arrastre $Re = 2 \times 10^6$

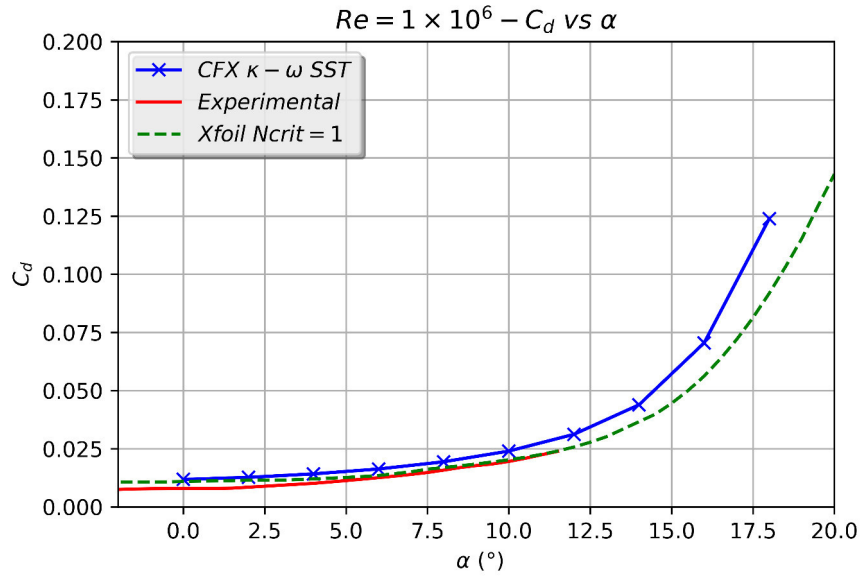
De manera análoga las Figuras 7.22 y 7.23 presentan la misma tendencia que las figuras anteriores, a excepción que los resultados del Xfoil sobreestiman a los experimentales a partir de los 6° aproximadamente para el caso de los coeficientes de sustentación.

FIGURA 7.22: Coeficientes de sustentación $Re = 1.5 \times 10^6$

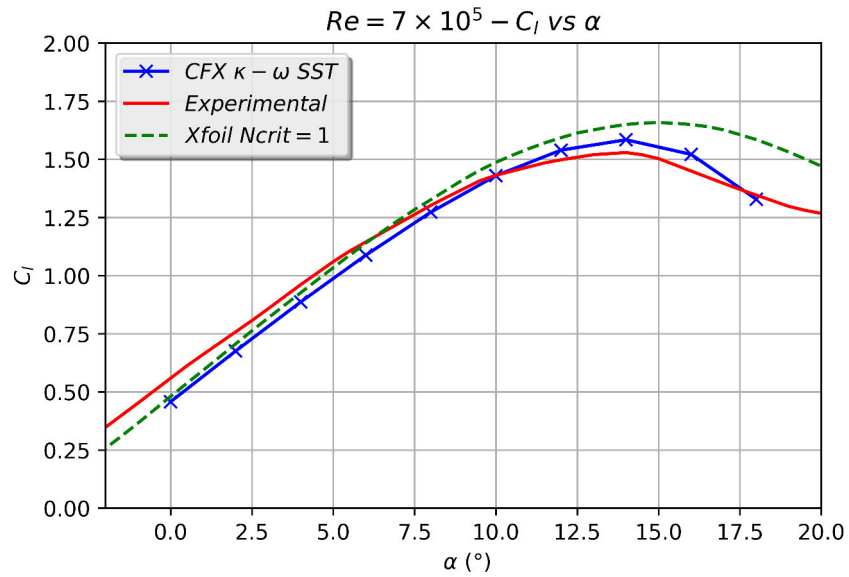
FIGURA 7.23: Coeficientes de arrastre $Re = 1.5 \times 10^6$

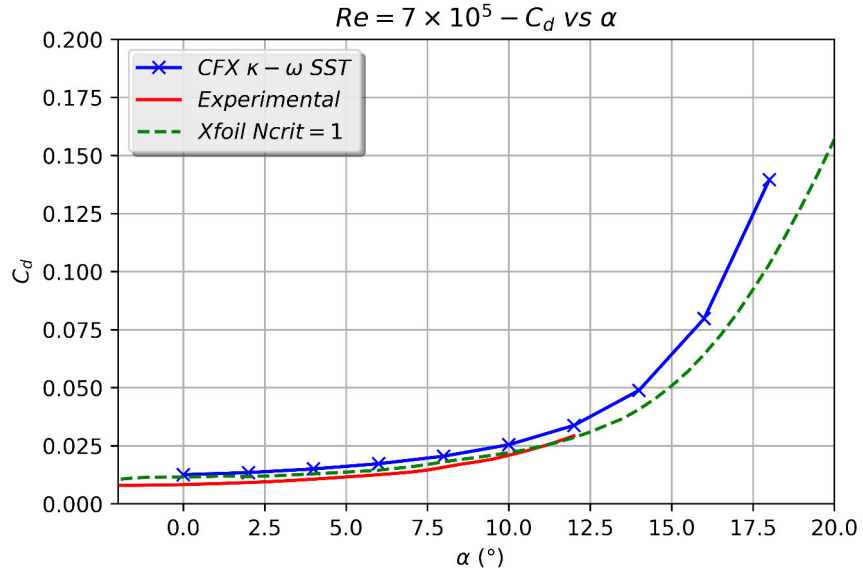
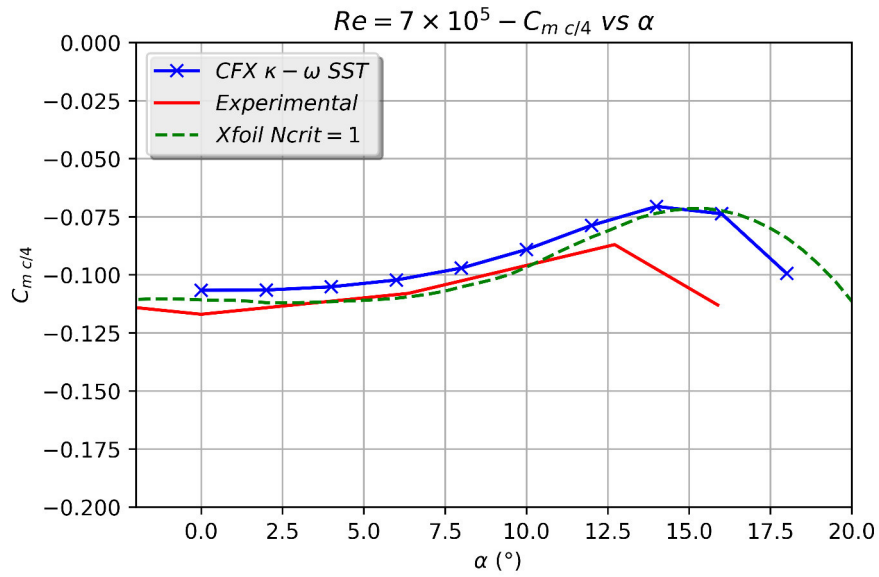
Para las Figuras 7.24 y 7.26 apreciamos que los coeficientes de sustentación computacionales guardan tendencia con los experimentales mientras para ángulos mayores a 8° los resultados del Xfoil sobreestiman nuevamente a los experimentales como en los casos anteriores.

FIGURA 7.24: Coeficientes de sustentación $Re = 1 \times 10^6$

FIGURA 7.25: Coeficientes de arrastre $Re = 1 \times 10^6$

Los coeficientes de arrastre computacionales en las Figuras 7.25 y 7.27 mantienen la misma tendencia sobrestimada con respecto a los experimentales. Los coeficientes provenientes del XFoil se mantienen con tendencia intermedia proxima a los experimentales. Caso análogo se da para el caso del coeficientes de momento de la Figura 7.28.

FIGURA 7.26: Coeficientes de sustentación $Re = 7 \times 10^5$

FIGURA 7.27: Coeficientes de arrastre $Re = 7 \times 10^5$ FIGURA 7.28: Coeficientes de momento $Re = 7 \times 10^5$

Como podemos apreciar desde la Figura 7.20 hasta 7.28 los resultados computacionales obtenidos mediante el simulador Ansys CFX se aproximan a los resultados experimentales [25] y los resultados provenientes del XFoil guardan una tendencia intermedia en los rangos descritos. Indicamos que para las condiciones nominales de la turbina eólica los ángulo de interés estan en el rango de 4° a 6° , en el cual se muestra una alta proximidad en la tendencia de los resultados.

7.4. Validación de los parámetros de la turbina eólica

La validación de los resultados computacionales se realiza comparando con los resultados analíticos obtenidos mediante el modelo de BEM cuando no se cuenta con información experimental disponible de la turbina eólica. Este proceso es descrito por Jensen [10].

Para ello se compara la potencia de la turbina eólica desarrollada por el modelo de BEM en función de los coeficientes aerodinámicos provenientes del Capítulo 5 y se optó por tomar el resultado desarrollado por la teoría de Hansen [2] debido a que es la potencia más conservadora.

Los resultados de los coeficientes de potencia y empuje de la turbina eólica se encuentran en la Tabla 7.9 y los podemos visualizar en la Figura 7.29. La diferencia de las magnitudes de la potencia varían en 0.2 kW (0.6 %) y del empuje axial varían en 0.4 kN (6.2 %).

Método	C_P	C_T	$P(\text{kW})$	$T(\text{kN})$
BEM	0.456	0.88	35.3	6.5
CFX	0.458	0.828	35.6	6.1

CUADRO 7.9: Resultados BEM vs CFX

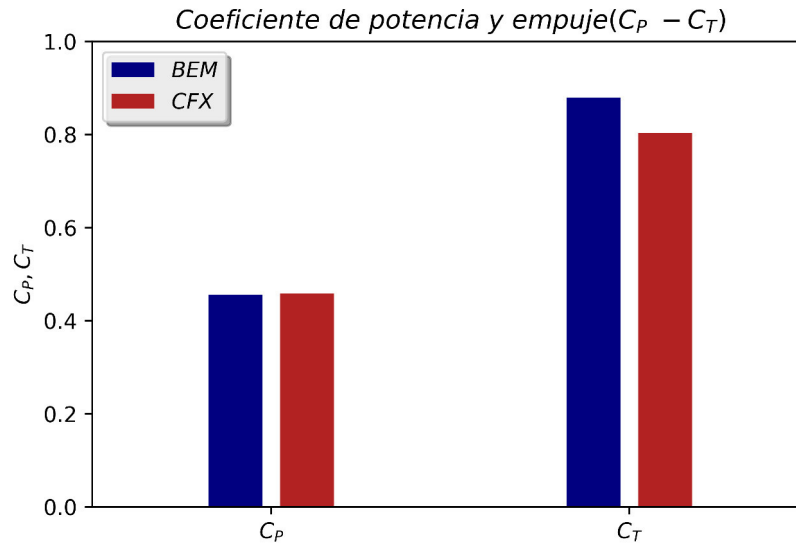


FIGURA 7.29: Comparación de los coeficientes de potencia y empuje - BEM vs CFX

Procederemos con el análisis de extracción de fuerzas para 1 *pala* las cuales provienen del modelo de BEM y de la simulación computacional mediante el uso del Ansys CFX para la malla MT1.

En la Tabla 7.10 y 7.11 mostramos los valores de fuerza normal y tangencial al plano del rotor de cada estación para el modelo de BEM y simulación computacional respectivamente.

<i>Estación</i>	P_n (N/m)	P_t (N/m)
3	149.693	58.988
4	181.061	60.082
5	212.868	60.631
6	245.188	60.83
7	275.746	60.903
8	307.839	60.764
9	339.721	60.584
10	372.853	60.283
11	404.681	59.956
12	435.905	59.647
13	467.891	59.271
14	500.045	58.846
15	535.288	58.294
16	561.728	57.951
17	593.65	57.388
18	633.553	56.476
19	653.379	55.761
20	688.032	54.161
21	707.175	51.326
22	707.494	44.738
23	255.246	-0.615

CUADRO 7.10: Resultados BEM - Fuerza normal y tangencial

Al comparar los valores de P_n en la Figura 7.30 apreciamos que la generación de fuerzas es mayor en el modelo de BEM que en el computacional. En el caso de la fuerza tangencial P_t vemos en la Figura 7.31 que la fuerza computacional es mayor al modelo de BEM en la raíz y disminuye a lo largo de las estaciones hasta la punta de la pala. Indicamos que el modelo de BEM está en función de los coeficientes aerodinámicos obtenidos de un análisis bidimensional, los cuales no incluyen los efectos tridimensionales que sí son considerados en la solución de las ecuaciones de Navier Stokes en la simulación computacional de la turbina eólica.

<i>Estación</i>	P_n (N/m)	P_t (N/m)
3	154.505	62.357
4	178.18	65.903
5	208.661	67.165
6	239.915	67.038
7	269.33	67.073
8	297.82	66.314
9	326.351	65.477
10	356.892	64.186
11	386.905	62.475
12	410.914	61.394
13	436.17	60.227
14	459.987	59.389
15	485.507	58.107
16	505.65	57.243
17	529.406	56.161
18	555.013	53.983
19	570.46	52.766
20	585.455	48.444
21	579.92	43.387
22	510.271	29.408
23	142.311	-13.513

CUADRO 7.11: Resultados CFX - Fuerza normal y tangencial

Se presenta en las Figuras 7.30 y 7.31 la extracción de fuerzas normal y tangencial al plano del rotor para cada estación.

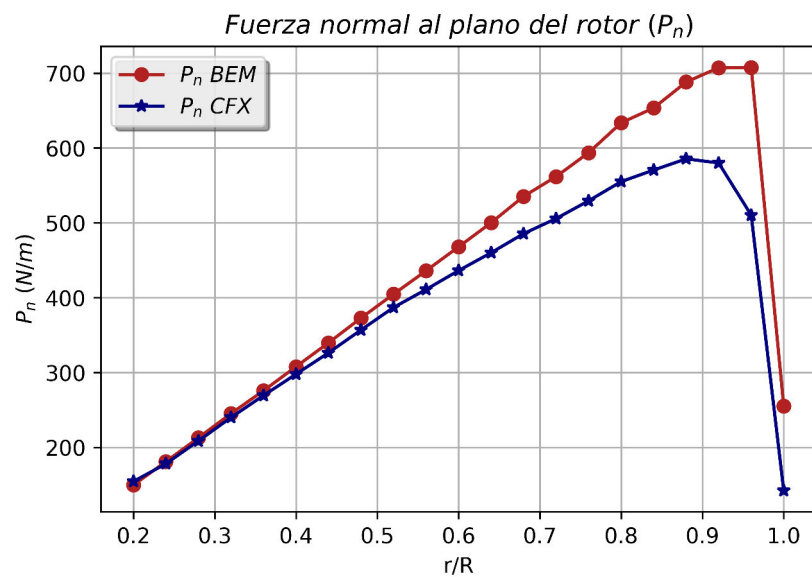


FIGURA 7.30: Gráfica comparativa de la fuerza normal- BEM vs CFX

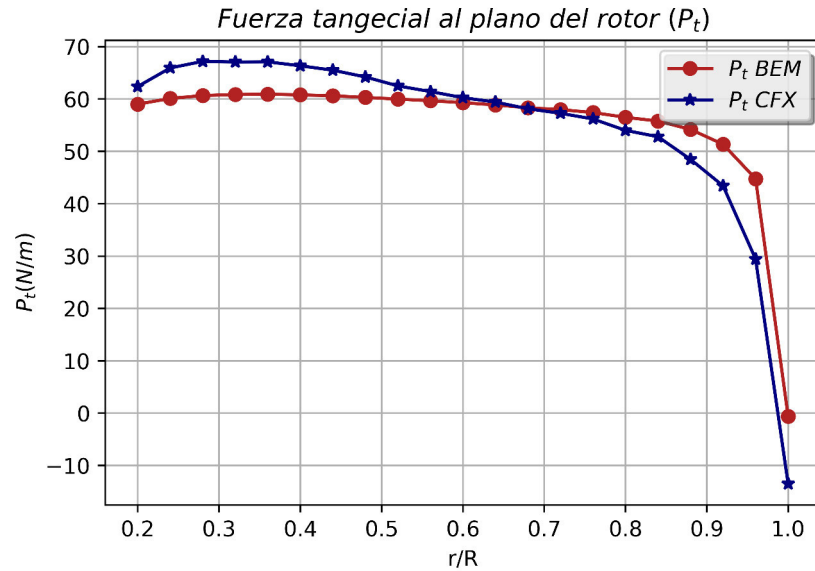


FIGURA 7.31: Gráfica comparativa de la fuerza tangencial - BEM vs CFX

Una vez extraídas las fuerzas normales y tangenciales al plano del rotor se procedió a generar las curvas de torque y empuje.

Para ello se realiza una integración de la fuerza tangencial provienten del modelo de BEM y del simulador Ansys CFX, la cual se muestra en la Figura 7.32. Podemos ver la similitud de la curvas en la generación del torque para ambos casos.

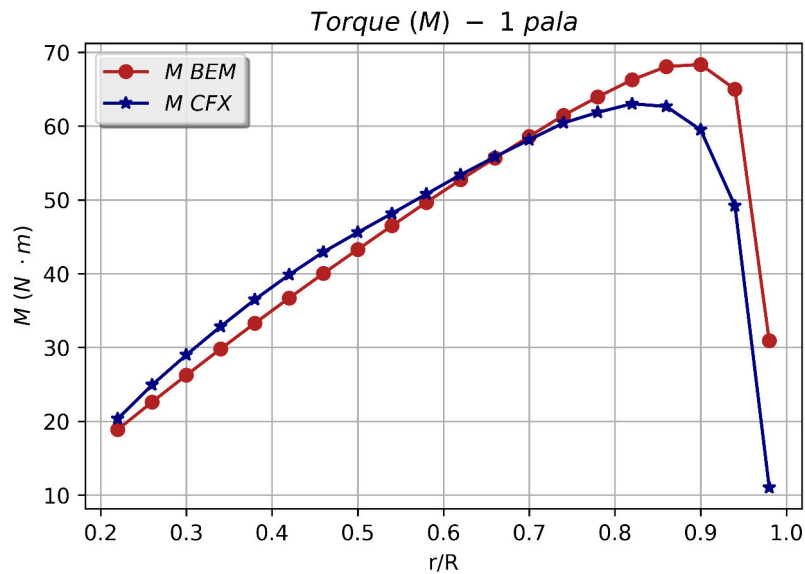


FIGURA 7.32: Torque en 1 pala

De forma análoga realizamos la integración para la fuerza normal de ambos resultados, obteniendo que el modelo de BEM genera mayor fuerza axial sobre el rotor de la turbina tal como se muestra en la Figura 7.33, manteniendo similar tendencia en los resultados.

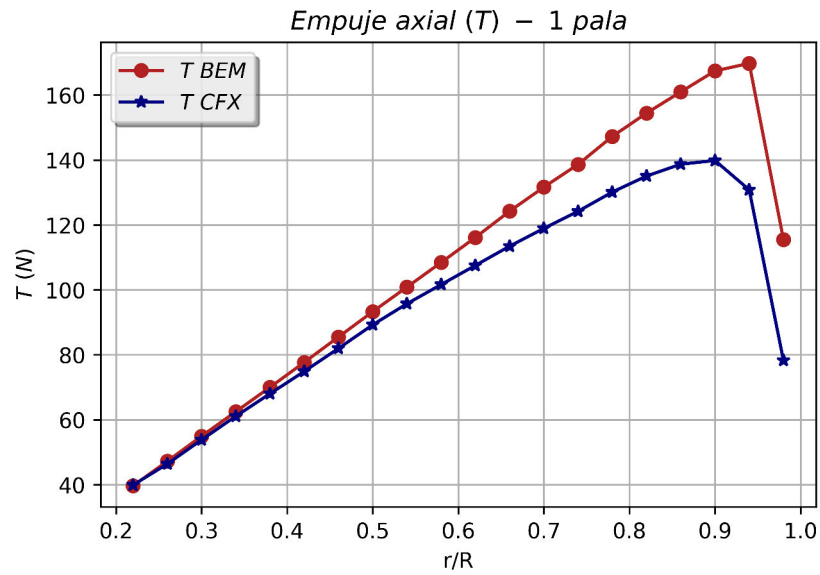


FIGURA 7.33: Empuje axial en 1 pala

Con la representación del torque generado y fuerza normal en las Figuras 7.32 y 7.33, damos por validado la potencia y empuje obtenido en comparación con los resultados teórico-número del modelo de BEM.

Capítulo 8

Generación de la curva de potencia de la turbina eólica

En este capítulo se sintetizará los resultados de los parámetros de la turbina eólica proveniente de ambos métodos.

De acuerdo a los resultados presentados en la Sección 7.2, tanto el modelo de BEM como la simulación computacional se realizaron bajo las condiciones de 10.5 m/s y 120 RPM .

Para la generación de la curva de potencia necesitamos ejecutar el modelo variando la velocidad de rotación de la turbina eólica descrito en la Tabla 6.2.

8.1. Curva de potencia basado en el modelo de BEM

Los resultados de la potencia presentados en esta sección son los provenientes de los coeficientes aerodinámicos obtenidos mediante el software Ansys CFX para la malla MP1 mostrados en la Sección 7.1.

Se precisa que según lo expuesto en la Sección 7.4 con la extracción de fuerzas normal, tangencial y la limitación debido al modelo 2D en base a la teoría de BEM, la curva de potencia es generada con fines comparativos.

El rango valido de los valores de λ es de 4.5 a 9.5, donde se puede apreciar en la Figura 8.1. Fuera de este rango se excede los valores de Reynolds y ángulos de ataque.

Para valores menores a $\lambda = 4.5$, el número de Reynolds es menor a 700 000 y los ángulos de ataque llegan a 30° . Esto es coherente debido que a bajos valores de velocidad angular la componente de velocidad tangencial al plano del rotor disminuye y aumenta el ángulo de ataque que incide sobre la sección de la pala. Por contraparte, para valores mayores a $\lambda = 9.5$ el número de Reynolds esta aproximadamente en 2 000 000 y el ángulo de ataque comienza a ser menor a 0° . Indicamos que se podría proceder con la obtención de estos valores, sin embargo debido a que el valor de diseño de la velocidad rotacional es de 120 *RPM* no se analizará más de este punto ya que es cubierto con el análisis actual realizado.

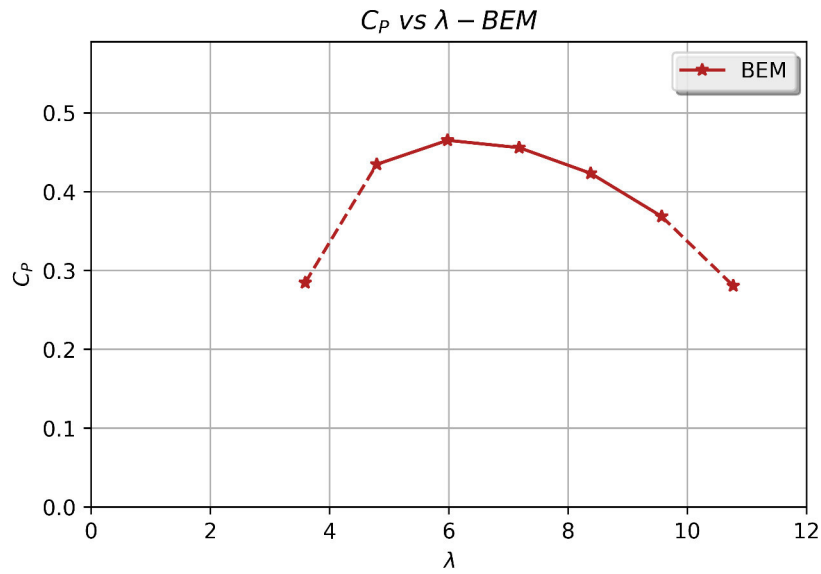


FIGURA 8.1: Resultados BEM - Curva de potencia vs tip speed ratio

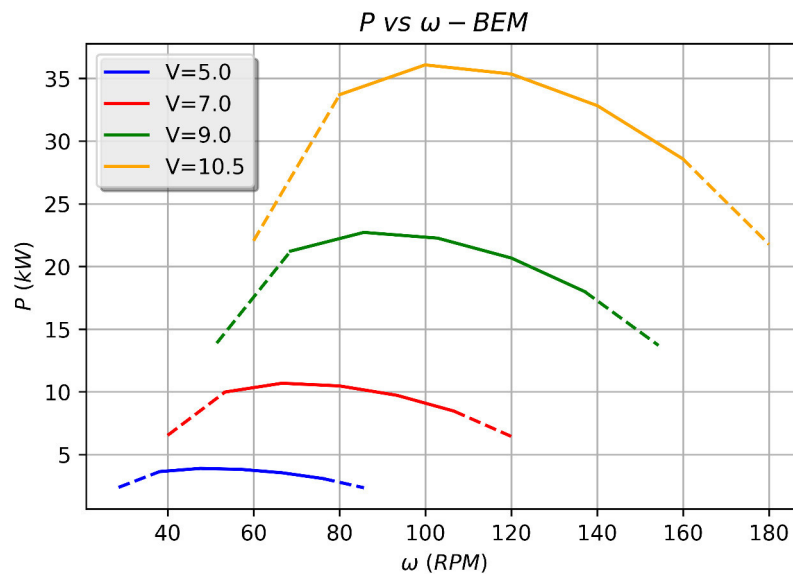


FIGURA 8.2: Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad rotacional

En la Figura 8.2 se representa los valores de potencia respecto a la velocidad rotacional para velocidades de flujo libre de 5, 7, 9 y 10.5, m/s .

Finalmente el gráfico de potencia respecto a la velocidad de flujo libre se representa en la Figura 8.3.

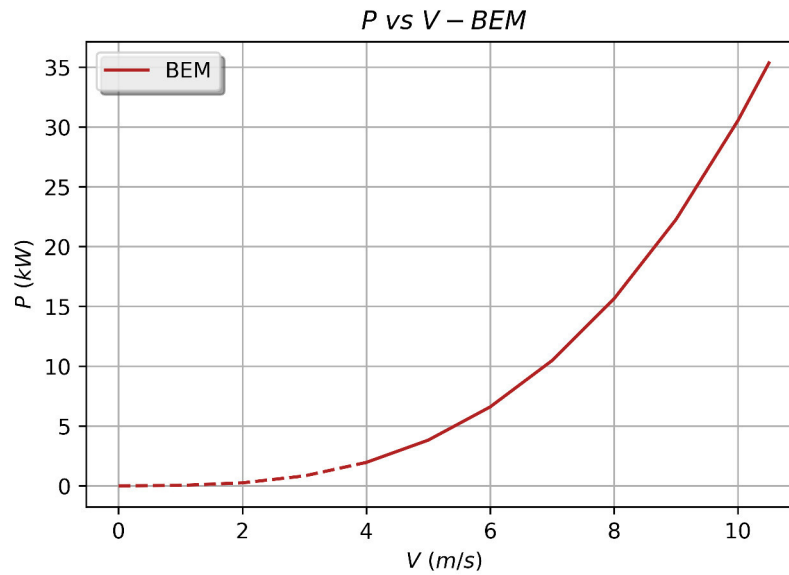


FIGURA 8.3: Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad del flujo libre

8.2. Curva de potencia basado en la simulación fluidodinámica

En esta sección se extrae los valores de la simulación computacional de la turbina eólica para las condiciones descritas en la Tabla 6.2.

A diferencia de la Sección 8.1, en esta sección se simuló el comportamiento de la turbina eólica para diferentes velocidades rotacionales. Es decir que los diferentes valores de velocidad normal y tangencial al plano del rotor y la interacción de las fuerzas radiales fueron consideradas en el proceso de solución de las ecuaciones gobernantes, situación que no sucede en el modelo teórico de BEM.

La curva de potencia proveniente de los resultados de la simulación fluidodinámica de la turbina eólica se presenta en la Figura 8.4. Con esta última gráfica podemos generar la curvas de potencia respecto a la velocidad rotacional para valores de la velocidad del flujo libre. Figura 8.5.

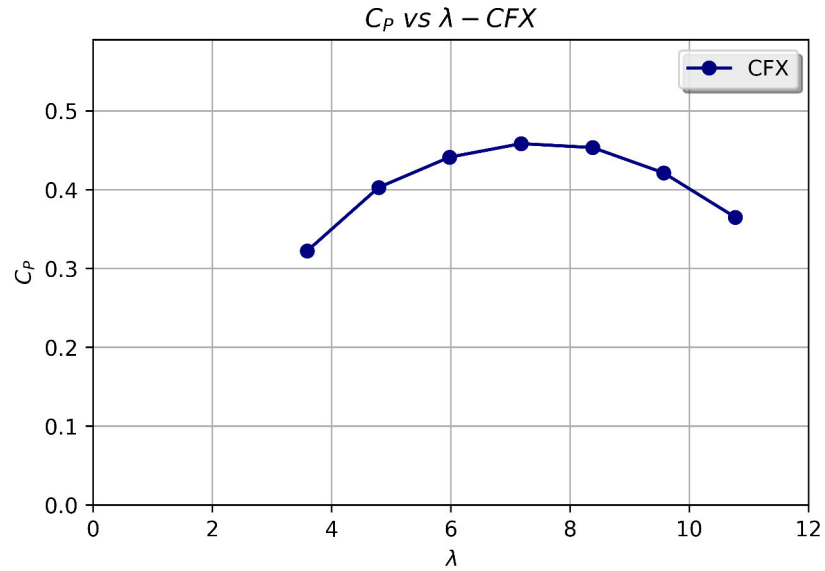


FIGURA 8.4: Resultados BEM - Curva de potencia vs tip speed ratio

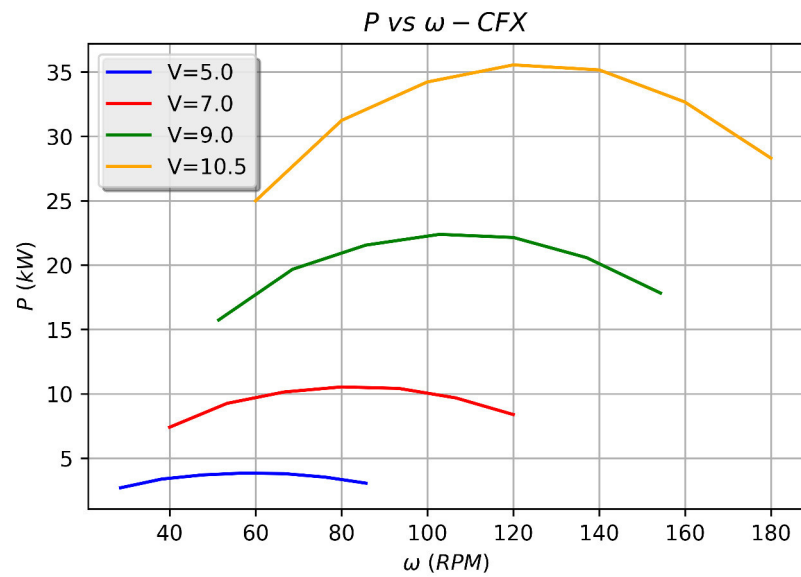


FIGURA 8.5: Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad rotacional

Finalmente presentamos la curva de potencia respecto a la velocidad del flujo libre, para los resultados computacionales, Figura 8.6, la cual será nuestro producto final en el estudio de la turbina eólica.

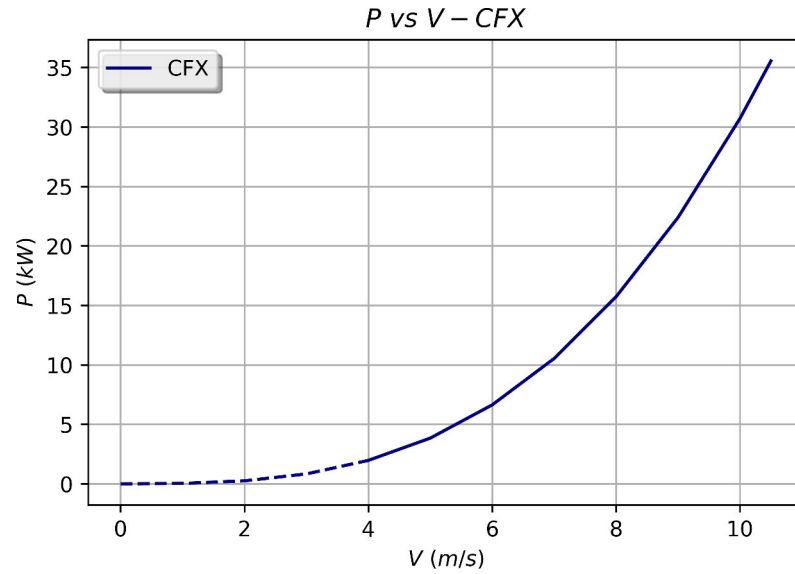


FIGURA 8.6: Resultados BEM - Curva de potencia vs velocidad del flujo libre

8.3. Comparación de las curvas de potencia

Culminando este capítulo presentamos la comparación de las Figuras 8.2 y 8.5 para visualizar la diferencia entre la generación de las curvas de potencia provenientes de ambos métodos.

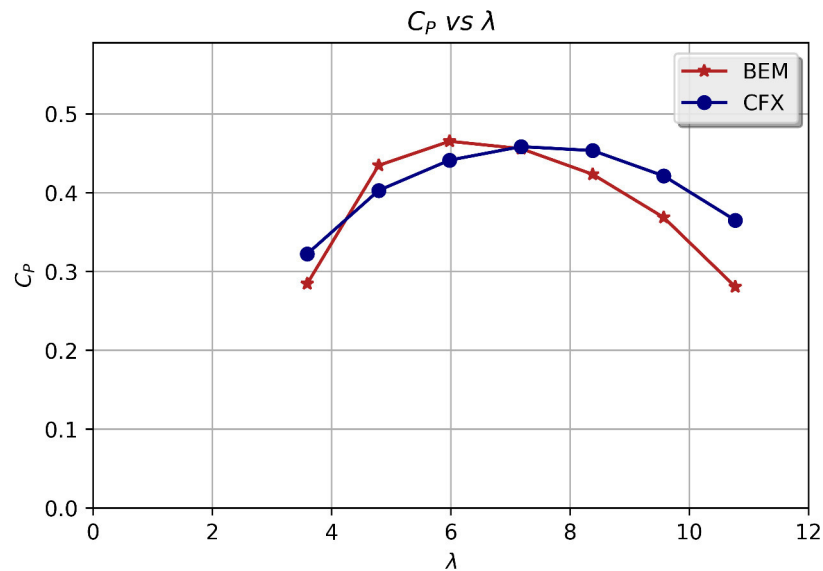


FIGURA 8.7: Comparación de la curvas de potencia

Observamos que ambos métodos coinciden en el punto de diseño ($\lambda = 7.18$), donde este es el máximo valor de potencia para el caso computacional. Vemos que para

la curva del modelo de BEM el máximo punto de extracción difiere al de diseño, ubicandose en $\lambda = 6$.

En última instancia, debido a la coincidencia del punto de diseño, no se genera diferencia consirable en la curva comparativa de potencia respecto a la velocidad del viento, tal como se muestra en la Figura 8.8.

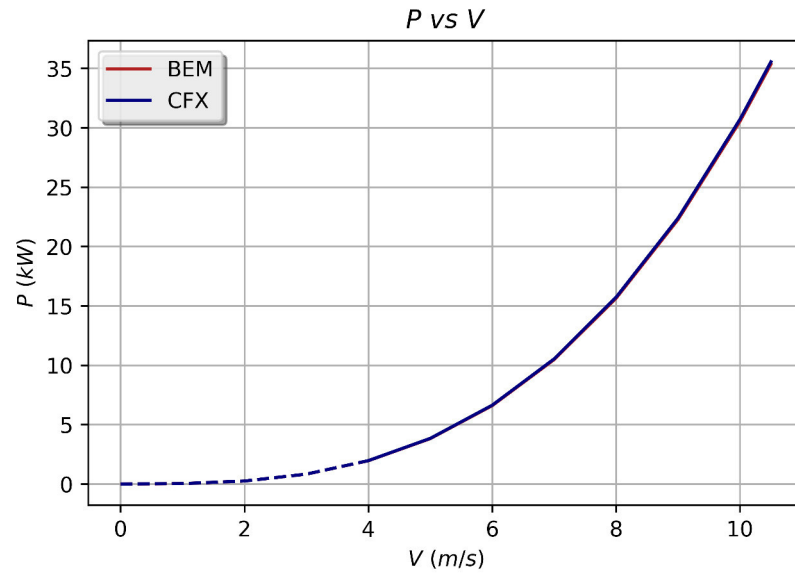


FIGURA 8.8: Comparación de la curvas de potencia

Capítulo 9

Conclusiones

- Los coeficientes aerodinámicos obtenidos de la simulación mediante el software Ansys CFX son próximos a los valores obtenidos por el Xfoil y también a los datos de la fuente experimental en el rango de ángulos de ataque de 0° a 12° .
- Se validó de forma satisfactoria el código generado en base al modelo de BEM para las condiciones nominales de las turbinas eólicas *OPT NACA 4412* y *OPT NACA 4418*.
- Los valores resultantes de potencia y empuje obtenidos a través modelo de BEM en base a las diferentes fuentes aerodinámicas (experimental, Xfoil y CFD), se encuentran próximos entre sí , sin afectar drásticamente los resultados finales del modelo. Los resultados de mayor valor fueron obtenidos por los datos experimentales, mientras que los valores intermedios por el Xfoil. Los valores menores fueron obtenidos por la simulación computacional, diferenciándose entre los experimentales y computacionales para la potencia P en $1.3kW$ (4 %) y para el empuje T en $0.2 kN$ (5 %).
- La simulación de la turbina eólica demostró que la potencia obtenida mediante la simulación computacional ($35.6 kW$) es próxima al modelo de BEM ($35.3 kW$), la cual difiere en $0.3, kW$ (0.8 %). De manera análoga el empuje mediante la simulación computacional ($6.1 kN$) es menor que en el modelo de BEM ($6.5, kN$), el cual difiere en $0.4, kN$ (6.2 %). Esto se debe a la extracción de potencia y empuje descritos en la Sección 7.4, los cuales varían y se incrementan a lo largo de la pala desde la raíz hasta la punta.

- Se concluye que el método de BEM es una buena herramienta para la fase de diseño debido a que el máximo punto de extracción de potencia se encuentra aproximadamente en su punto de diseño en la simulación computacional.
- Los resultados obtenidos por la simulación computacional son suficientemente confiables debido a que no están sujetos a simplificaciones del modelo de BEM, el cual no toma en cuenta la influencia radial y los efectos tridimensionales en su proceso de iteración.
- La curva de potencia obtenida por el modelo de BEM carece de validez para valores del *TSR* (Tip Speed Ratio) considerablemente menores al del valor de diseño, debido a que se tendría que tener información de los coeficientes aerodinámicos para ángulos de ataque entre 20° a 30° aproximadamente para poder analizar la turbina a velocidades rotacionales menores.
- A través del modelo de turbulencia *SST* usado en el perfil aerodinámico se obtuvieron resultados próximos a los experimentales y numéricos.
- En la simulación de la turbina eólica, el modelo de turbulencia *SST* permitió validar los resultados de manera satisfactoria con aquellos obtenidos por el model de BEM.
- En el proceso de mallado del perfil aerodinámico, la herramienta ICEM permitió generar menor cantidad de elementos manteniendo una óptima calidad de los mismos y de los resultados.
- El estudio de independencia de malla para la turbina eólica mostró el carácter asintótico de los resultados de la potencia y empuje. Además permitió comparar la distribución de la presión y del esfuerzo cortante con los resultados obtenidos por la simulación del perfil aerodinámico, concluyendo con la selección de la malla MT1.
- Considerando una eficiencia mecánica de 0.99 y una eficiencia eléctrica de 0.9, las potencias obtenidas mediante el modelo de BEM y la simulación computacional se vuelven respectivamente $P_{e_{BEM}} = 31.5 \text{ kW}$ y $P_{e_{CFX}} = 31.7 \text{ kW}$, donde ambas son mayores a la potencia nominal de 25 kW del *Waira 12*.

Capítulo 10

Recomendaciones

- Se recomienda realizar pruebas experimentales del perfil Wortmann FX 60-126 con la finalidad de obtener los coeficientes aerodinámicos para ángulos de ataque mayores a los presentados en esta investigación y así poder ampliar el rango de validación.
- Se recomienda investigar sobre la transición de la capa límite laminar a turbulenta durante pruebas experimentales y computacionales de perfiles aerodinámicos. Así también profundizar en los modelos de turbulencia que pueden predecir el desprendimiento del flujo y la transición de la capa límite.
- Se recomienda verificar los valores de potencia obtenidos por la simulación computacional con valores experimentales en campo para así validar los resultados.
- Se recomienda hacer un análisis de la distribución de fuerzas sobre el eje actuante de la pala en base al centro de presión del perfil aerodinámico.
- Se recomienda obtener la producción total de energía que generaría la turbina eólica en el lugar de instalación y corroborar si trabaja en el punto de diseño.
- Se recomienda realizar un estudio de *ángulo de paso variable* de la turbina eólica. A su vez, complementar el análisis con información procedente del estudio de energía generada.
- Se recomienda analizar la turbina eólica tomando en consideración la inclinación del plano del rotor y la influencia de la torre para estimar la diferencia en los parámetros de potencia y empuje.

Bibliografía

- [1] Vassili Samsonov. (2006). “*Aerodinámica y control de turbinas eólicas*”. Pontificia Universidad Católica del Perú..
- [2] Martin O.L. Hansen. (2008). “*Aerodynamics of Wind Turbines*”. Segunda edición, Earthscan, Reino Unido..
- [3] ABB. (2012). “*Cuaderno de aplicaciones técnicas no 12. Plantas eólicas*”. ABB.
- [4] Tonio Sant. (2007). “*Improving BEM-based Aerodynamic Models in Wind Turbine Design Codes*”. Universidad de Mala .
- [5] Carlos Muñoz Razo. (2011). “*Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*”. Segunda edición, Pearson. .
- [6] Charles Hirsch. (2007). “*Numerical Computation of Internal and External Flows - Volumen 1 Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*”. Segunda edición, Butterworth-Heinemann. .
- [7] Fei-Bin Hsiao, Chi-Jeng, Wen-Tong Chong. (2013). “*The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods*”. National Cheng Kung University, University of Malaya.
- [8] David Wood. (2011). “*Small Wind Turbines - Analysis, Design, and Application*”. Springer.
- [9] Peter J. Schubel, Richard J. Crossley. (2012). “*Wind Turbine Blade Design*”. University of Nottingham, University of Park.
- [10] Jørgen Jensen Tande. (2011). “*CFD Study of a 10 MW Offshore Horizontal Axis Wind Turbine Blade*”. Norwegian University of Science and Technology.

- [11] Roberto Luis Zegarra Velasquez. (2015). “*Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina francis*”. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [12] Jonathan Wiebe. (2015). “*Development of a Simulation and Optimizacion Framework for Improved Aerodynamics Performance of R/C Helicopter Rotor Blades*”. Carleton University.
- [13] J.F. Manwell, J.G. Mcgowan, A.L. Rogers. (). “*Wind Energy Explained, Theory Design and Application*”. Segunda Edición, Wiley.
- [14] C.J. Bai, Fei-Bin Hsiao. (2013). “*Design of 10 kW Horizontal-Axis Wind Turbine (HAWT) Blade*”. National Cheng Kung University, University Road.
- [15] Pedro Gamio Aita. (2014). “*Energías Renovables y Cambio Climático*”. Konrad Adenauer Stiftung.
- [16] Dnyanesh A. Digaskar. (2010). “*Simulations of FLOW Over Wind Turbines*”. University of Massachusetts.
- [17] Miguel Cortez Aguilar. (2014). “*Análisis aerodinámico de la hélice de un aerogenerador tripala de eje horizontal de 3kW mediante simulación numérica*”. Pontificia Universidad Católica del Perú..
- [18] Flores Diego Heredia. (2016). “*Estudio de comprobación del diseño de la hélice, la torre y la gondola de un aerogenerador tripala de 20kW mediante simulación numérica computacional*”. Pontificia Universidad Católica del Perú..
- [19] Carlo Enrico Ccarcangiu . (2008). “*CFD-RANS Study of HAWT*”. Università Degli Studi Di Cagliari.
- [20] Pletcher, Tannehill, Anderson. (2013). “*Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*”. Third Edition, CRC Press.
- [21] David C. Wilcox. (2006). “*Turbulence Modeling for CFD*”. Third Edition, DCW Industries.
- [22] F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish. (2015). “*The Finite Volumen Method in Computational Fluid Dynamics*”. Springer.
- [23] F. X. Wortmann und D. Althaus. (1964). “*Der Laminarwindkanal des Instituts für Aero- und Gasdynamik an der Technischen Hochschule Stuttgart*”. Stuttgart University .
- [24] F. X. Wortmann. (1957). “*Experimentelle Untersuchungen an neuen Laminarprofilen für Segelflugzeuge und Hubschrauber*”. Stuttgart University .

BIBLIOGRAFÍA

- [25] D. Althaus and F.X. Wortmann . (1981). *“Stuttgarter Profilkatalog I”*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- [26] D. Althaus . (1996). *“Stuttgarter Profilkatalog II - Niedriggeschwindigkeits-profile”*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- [27] John D. Anderson, Jr.. (2010). *“Fundamentals of Aerodynamics”*. Fith Edition, McGraw-Hill.
- [28] T. Cebeci, M. Platzner, H. Chen, K. Chang, J. Shao. (2005). *“Analysis of Low-Speed Unsteady Airfoil Flows”*. Springer - Horizons Publishing.
- [29] Ministerio de Energía y Minería del Perú. (2016). *“Atlas Eólico del Perú”*.
- [30] Comité de operación económica del sistema interconectado nacional. (2016). *“Informe de la operación anual del SEIN”*.

Anexo A

Uso de software Ansys CFD

Se presenta documento de autorización del uso del Software Ansys CFD en el laboratorio del INACOM de la Universidad Pontificia Católica del Perú.

Lima, 16 de febrero de 2018

Sr.

Luis Manuel Mendoza Gomero

Tesista – E.A.P. Ingeniería Mecánica de Fluidos

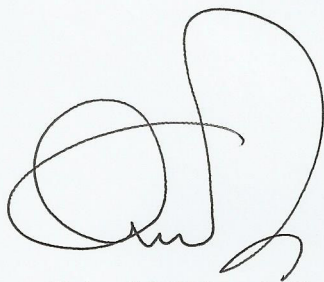
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Asunto: Uso de Software ANSYS CFD en Laboratorio del INACOM

Estimado Sr. Mendoza

Por medio de la presente se le autoriza a utilizar el software ANSYS CFD instalado en el Laboratorio del INACOM (Grupo de Investigación Asistida por Computadora) para el desarrollo de su tesis titulada *“Análisis aerodinámico del perfil Wortmann FX 60-126 empleado en una turbina eólica y comprobación del coeficiente de potencia mediante modelos analíticos y métodos numéricos”*.

Un cordial saludo.



Quino M. Valverde Guzmán, Dr. Ing.

Profesor Principal

Grupo INACOM

Sección Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica del Perú

Teléfono: (+51-1) 6262000 Anexo 4875

Email: qvalver@pucp.edu.pe

Anexo B

Procesamiento Profilkatalog I - Wortmann FX 60-126

Se presenta el script *Code for profilkatalog* elaborado en Octave para obtener los coeficientes aerodinámicos del perfil Wortmann FX 60-126.

CODE FOR PROFILKATALOG (OCTAVE)

```
clear all
clc
pkg load image

I=imread('imagen_recortada.jpg');
%insertar la imagen recortada previamente lista para escalar
image(I);
title=input('Ingresar titulo')
ex=input('Ingresar escala en el eje x\n');
explus=input('Ingresar rango inicial faltante eje x \n');
ey=input('Ingresar escala en el eje y\n');
eyplus=input('Ingresar rango inicial faltante eje y\n');
pt=input('Ingresar cantidad de puntos a tomar\n');

image(I);
[my,nx,p]=size(I);
[x,y]=ginput(pt);

n=length(y);
ynew=(my-y)*ey/my+eyplus
xnew=x*ex/nx+explus
figure(1)
image(I)
figure(2)
plot(xnew,ynew);
grid on

data=[xnew,ynew];
file=fopen('resultado1.txt','wt')
for i=1:n
fprintf(file,'%6.6f\t %6.6f\n',[xnew(i);ynew(i)])
end
fclose(file)
```

Se ejecutó el script hasta obtener los coeficientes de sustentación y arrastre. Los archivos generados son para los diferentes valores del número de Reynolds $Re = [7.0E05, 1.0E06, 1.5E06, 2.0E06]$.

$\alpha(^{\circ})$	C_l
-7.77	-0.28
-6.07	-0.09
-4.06	0.12
-2.65	0.28
-1.11	0.44
0.58	0.62
2.64	0.82
3.99	0.96
5.31	1.09
8.1	1.31
9.68	1.42
11.64	1.49
13	1.52
14.1	1.53
14.87	1.51
17.31	1.38
19.16	1.29
22.5	1.2

CUADRO B.1: $Re = 7.0E05$ - C_l vs α

C_d	C_l
13.9	-0.29
12.58	-0.23
11.02	-0.18
10.15	-0.11
9.36	-0.03
8.44	0.06
8.13	0.17
7.91	0.22
7.95	0.29
7.95	0.42
8.17	0.54
8.79	0.69
9.56	0.83
10.68	0.97
11.95	1.1
13.39	1.21
14.88	1.28
16.43	1.32
18.85	1.4
20.29	1.43

CUADRO B.2: $Re = 7.0E05$ - C_l vs C_d

$\alpha(^{\circ})$	C_l
-8.4	-0.35
-7.13	-0.21
-5.63	-0.06
-3.81	0.14
-2.36	0.31
-0.99	0.46
0.8	0.64
2.69	0.85
4.16	0.99
5.84	1.15
7.42	1.31
8.61	1.42
10.56	1.51
12.35	1.58
13.5	1.59
14.53	1.56
15.96	1.47
18.12	1.35
20.5	1.27
23.49	1.17

CUADRO B.3: $Re = 1.0E06$ - C_l vs α

C_d	C_l
12.46	-0.36
11.05	-0.3
9.49	-0.2
8.55	-0.12
7.5	0.02
7.35	0.09
7.14	0.14
7.22	0.21
7.24	0.31
7.64	0.37
7.85	0.47
7.91	0.56
7.91	0.64
8.06	0.72
9.05	0.85
10.18	0.98
11.3	1.07
13.41	1.23
14.62	1.31
16.61	1.4
18.73	1.47
21.03	1.51

CUADRO B.4: $Re = 1.0E06$ - C_l vs C_d

$\alpha(^{\circ})$	C_l
-7.7	-0.31
-6.01	-0.11
-4.18	0.09
-2.08	0.33
-0.69	0.48
1.03	0.66
2.95	0.87
4.24	1.01
5.03	1.07
8.12	1.34
9.17	1.42
10.85	1.53
11.62	1.57
12.83	1.62
13.75	1.61
14.19	1.58
14.6	1.53
15.94	1.42
17.71	1.31
19.04	1.25
19.88	1.23
20.8	1.2
22.44	1.14
23.57	1.13
24.5	1.13
26.01	1.17

CUADRO B.5: $Re = 1.5E06$ - C_l vs α

C_d	C_l
10.25	-0.3
9.34	-0.18
9.02	-0.12
7.68	0
7.56	0.07
7.02	0.21
6.61	0.27
6.87	0.34
7.06	0.47
7.27	0.55
7.79	0.68
8.45	0.8
9.79	0.95
10.91	1.07
12.39	1.2
14.55	1.34
17.01	1.46
18.79	1.5
20.63	1.54
23.55	1.58

CUADRO B.6: $Re = 1.5E06$ - C_l vs C_d

$\alpha(^{\circ})$	C_l
-7.04	-0.25
-5.26	-0.04
-4.19	0.07
-1.74	0.34
-0.46	0.49
1.29	0.69
4.56	1.03
6.14	1.18
8.18	1.37
9.06	1.45
10.56	1.54
11.37	1.6
13.45	1.68
14.23	1.68
14.76	1.58
15.58	1.5
16.3	1.44
18.49	1.34
19.71	1.29
21.06	1.25

CUADRO B.7: $Re = 2.0E06$ - C_l vs α

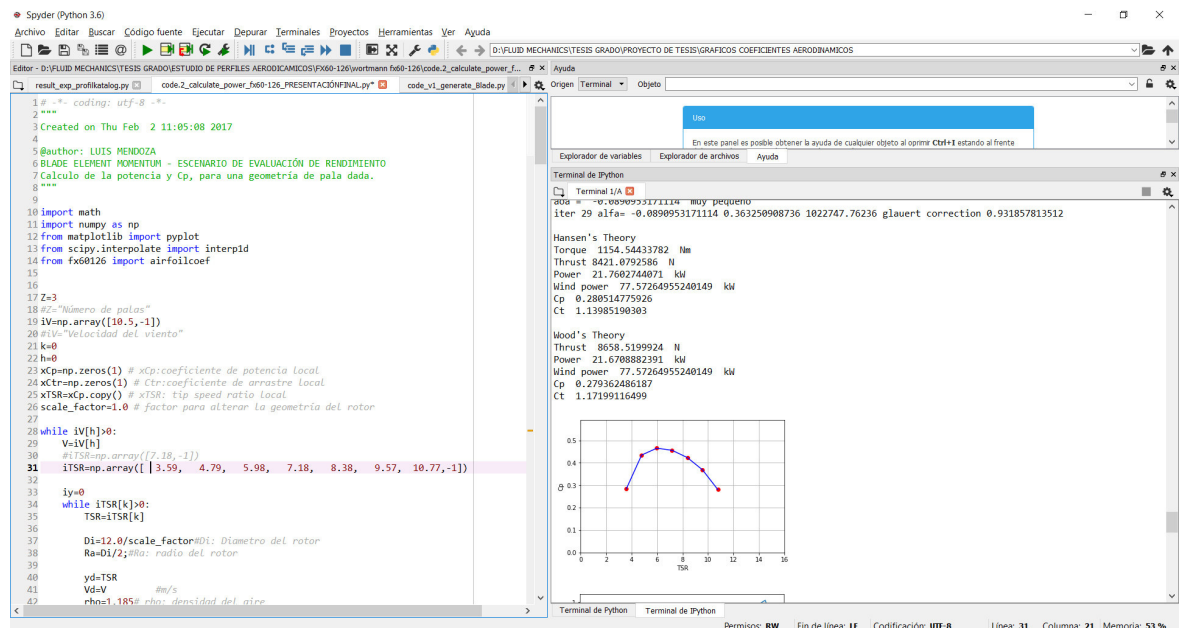
C_d	C_l
9.52	-0.25
8.38	-0.09
7.83	0.03
7.53	0.1
7.07	0.18
6.77	0.29
6.8	0.4
7.16	0.53
7.48	0.63
8.15	0.79
8.55	0.87
9.05	0.94
9.81	1.01
10.54	1.08
11.8	1.23
13.63	1.36
15.16	1.43
16.77	1.5
20.11	1.6
22.38	1.65

CUADRO B.8: $Re = 2.0E06$ - C_l vs C_d

Anexo C

Blade Element Momentum

Se presenta el código *Code for BEM* elaborado en Python para obtener los coeficientes de potencia y arrastre de una turbina eólica.



é--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. éḡ i dōō í ð wāííìì òkā ékóéú
 éí éh--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. éí éh÷ḡ i dðò í ð wāííìì òkā í éāóðāi øéú
 7H|āēPl̥ ðHðhXāXII
 Lí H--āēPl̥ ðHðhXāXII 7Lí Hḡ úépēí é üdī éú XIøē hēððí Hét ðð üdī éúXII
 éúòé--āēPl̥ ðHðhXāXII 7éúòéḡ †āóí üð í ð éí ééí ð
 í ü--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. í üḡ i dððøi ððāí ð í ð hī hī ðāí éì òkā
 í í--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. í íḡ i dððøi ððāí ð í ð éHhēhī Hð
 ē÷ø--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. ē÷øḡ †āóí üð í ð òüi üð wāi wí ðāí ð
 #ā--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. #āḡ i dððøi ððāí ð í ð òi ðHí é āðHþéú éú éüéāð í ðü Hðí dH
 #í --āēPl̥ ðHðhXāXII 7. #í ḡ i dððøi ððāí ð í ð òi ðHí é í éāóðāi øéú éú éüéāð í ðü Hðí dH
 éwí ðH--āēPl̥ ðHðhXāXII
 éhðā--āēPl̥ ðHðhX 622X 7. \$ðāí ð 115.ðh ðü āi þðHð í ð wí ðHéí ððāðh ééHé 118A15.éHðHúéí ð éðH éwí ðH
 7Høóþé|āēPl̥ ðHðhXāXII
 5í --āēPl̥ ðHðhXāXII 75í ḡ IJðüðí wí éí í ðü òüi üð wāi wí ðāí ð
 2ð--āēPl̥ ðHðhXāXII 7. 2ðḡ āiþðHð í ð HðLáí ðüH
 í ðü--5ðA 29 7. í ðüḡ í ðüðHéāí øé

7.02/ #%B/) 4%2! 4) 6/). 4%2. / A "%

í 井-井 5iv ~~A井~~ 2iv

òđđ ø øā HéāóđXđXđ

7Hii0iv1P:1288::8P12148<0

éiviv·517.

$$e_i e_h \div i i v \cdot 2^p$$

ổ đũa đũa... 5.

ēHōāī X(19)hī éi øKā(17)ØXII

ù---2.

$ij \div \emptyset \ddot{u} \check{\text{đ}}$ $\check{\text{đ}} \# \# \check{\text{đ}} \dots \bar{i}$ $\check{\text{d}} \ddot{u} \check{\text{x}}$

7òđ# ù øā HéāóǎX118XII

ù--ù ②5.

7eHøāī Xīn(7eXīn)

Lí Hiiiv-Lí <HiiivI2é

ē÷øiiv-pēī ÷Pēī ēāXXX5PÆiivXIIIí FiiivXIX5PZēí ēh÷iivXII

éüòéiv-ē÷øivāī÷đī éiv

ké--éüòéüiv-512 Ipéī ÷ Pēø

7# / %& #) % 4% ! %2 / \$) . ! -) # / 3 \$ % 0 %2 & , A 85. #) u.

5ī īiv-XāēPhēH XK5āēīivXII+6XLí Hīiv-X5Zēí ēh-īivXII+6XII 7. p Ih

2điv-5ī iv-6í ÷ ivTāi

Hö@Höar--2döiv 7éHöóéí d' hüd ééHé pdaör d'Höüdf ad hÖHjÖ ééHé i{üi{üü
7.,!-! !, ! 85.#) u. !)28/), #/%& % 85.#)/. \$% !.'5,/ \$%

7.14! 15% 9 % .5- %/ \$% 2%0./, \$3
iii üüiví üüiv-éHòdùì dđòXké†2đüüivX

hóobé--i iioiv: IX6 +béi ÷Pēø ←HiioiXII 7. hóobé, i dǎòøi oǎāi ð í ð hǎüøi ðl

#āiiv ivi üiiv iv-bēi ÷ Pī dhXē ÷ o iiv i XII ② í iiv iv-bēi ÷ P hōā Xē ÷ o iiv i XII

𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 𐌿𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰-𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 ÷ PhōāXē ÷ 𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 ÷ Pī dhXē ÷ 𐌸𐌹𐌳𐌹𐌶𐌰 XII

7#/ 22%#) u. \$% 02! . 4\$.

ò-2P9←←X2éA^HiioivXIII^Hiioiv-béI÷P^hoāXē÷øiioivXII

&-X€←pēī ÷Pēī dñX|pēī ÷PōkēX|AòX|III|pēī ÷PēoX|II|

ēī ḏpē...Xīhōópé ← #ā īiō iXIX 8 ← & ← bēī ÷ Phōā Xē ÷ o īiō iXII ← EXII

éí éh÷ī ḏbē---Xhóópé←# īiōivXIX8←&←pēī÷P̄hōāXē÷ōiōivXIIpēī÷P̄i d̄hXē÷ōiōivXVII

[illegible]

(10101#/ 22%#) u. \$% ' , ! 5%24(10101)

é②③---517.

ì dāí øi ødāéü---X5 Ié ②0 X~~1~~5.

95:5 Iēī ōpē

[illegible]

òðŦ ø øā HéāóðXāA5XŦ
! - iioiv-XŦ iio(5iAŦ iioiXIIIŦHiiio(5iAŦHiiioiXII

"- iiviv-X0i iiviv-Fiiib 35ivA0i iiv 35iv-FiiibivXIXFiiib 35iv-FiiibivXII
 - iiviv-X517XII! - iiviv-Xpét ÷PédijXFiiib 35ivF 7Xpét ÷PédijXFiiibivF 7XII:2P 9<"- iiviv-XFiiib 35iv< 6AFiiibiv< 6XII
 00 äePøhåéäXI iivivXII
 - dp~ dp
 ðühðg
 - dp~ dp@ iiviv

! 1 iiviv-X0ä iiv 35ivA0ä iivivXIXFiiib 35iv-FiiibivXII
 " 1 iiviv-X0ä iiviv-Fiiib 35ivA0ä iiv 35iv-FiiibivXIXFiiib 35iv-FiiibivXII
 4 iiviv-X516XII! 1 iiviv-Xpét ÷PédijXFiiib 35ivF 6Xpét ÷PédijXFiiibivF 6XII:5<" 1 iiviv-XFiiib 35ivAFiiibivXII
 00 äePøhåéäXII iivivXII
 4F-4F
 ðühðg
 4F-4F@ iiviv

í #ë--432 <hi pXII ðüi dFXII 7 00ðHðäi 0éü ì dð00i 0ðäi ð í ð èdñ ðäi 0é XHð0 7dñi iivivXII
 í #i H- hi pXII ðüi ÷FXII 7 00ðHðäi 0éü ì dð00i 0ðäi ð í ð éHéñi Hð XHð0 7dñi iivivXII

4÷H hī ~: <4F
 4dñi ð~: < dp
 0dijðH-4dñi ð <dpð0é 15222 70/4% #)! \$%, ! 452") .! %u,) #!
 0ijðäi --0ijðäi 15222.
 #ë--0dijðH 0ijðäi 7#/ %& #) % 4% \$% 0/4% #)! \$%, ! 452") .! %u,) #! XHð0 (éähðäi iivivXII
 #i H-4÷H hī IX 2P 9<F-ð <6 << 6<éHðéXII
 ēHðäi X(2):XII
 ēHðäi X(2) éähðäi (ñ 4÷ðdñL:(XII
 ēHðäi X(4dñi ð (ñ 4dñi ð F(1). p(1XII
 ēHðäi X(4÷H hī (ñ 4÷H hī F(1). (1XII
 ēHðäi X(0dijðH (ñ 0dijðH F(1) ú7(1XII
 ēHðäi X(17ðäi èdijðH (ñ 0ijðäi F(1) ú7(1XII
 ēHðäi X(1#ë (ñ #ëXII
 ēHðäi X(1#i (ñ #i FXII
 ēHðäi X(2):XII
 ēHðäi X(27dñi (ñ 4÷ðdñL:(XII
 ēHðäi X(4÷H hī (ñ í #i H< 2P 9<F-ð <6í << 6<pét ÷Pè0<X2é << 6XII(1). (1XII
 ēHðäi X(0dijðH (ñ í #ë < 2P 9<F-ð <6í << 7<pét ÷Pè0<X2é << 6XII 5222F(1) ú7(1XII
 ēHðäi X(17ðäi èdijðH (ñ 0ijðäi F(1) ú7(1XII
 ēHðäi X(1#ë (ñ í #ëXII
 ēHðäi X(1#i (ñ í #i FXII

7äðì ðhéHð ðä ì éhð í ð 0ä0HðhéH IJéHðéH IJðüdi 0í éí ðh í ð IJððäi ð
 K#ë--äePøähðH XK#ëFúF#ëXII
 K#i H-äePøähðH XK#i FúF#i FXII
 K432--äePøähðH XK432FúF432XII

ú~ú 35.

÷~÷ 35

(2)(2)
 #/ %& #) % 4% ! %2/\$). <-) #/3 A 0%2&), 7/24-!.. 88 102A5610.
 3ð ēHðèdñi 0ðäé üé 0ä0ðHðéi 0Kä í ðü èðH00ü èéHé ì éí é ä/pðHð í ð HðLadüi Hð
 (2)(2)

í ð0 ì 0K 850jdñi péää0K102561(XXII
 70i äi 0Kä ì dñ 0ä0ðHðéi 0Kä ēHðJ0ä0ðäi ð í ð üé h0pi èüi 0Kä í ðü èðH00ü pðí 0éäi ð #88
 Hð--ii 522222F1122222F 5222222F 5922222F 6222222iv

āi p@Hō--üðāXHōXII
 āk--āēPl̄ ðHdhX52XIIāk iiv 52.
 āl--āēPéHēL:Xi1f1ivXII

Hōh8525:--āēPóðāòHd̄pī kī X(Hōhī ūī éí dh̄ 8P 52Hō5Pī kī (fí ðüøpøī ðH--(10)XII
 édé 8525:--Hōh8525iiv 5iv
 ì ü 8525:--Hōh8525iiv 6iv
 ì í 8525:--Hōh8525iiv 7iv
 ā 8525:--üðāXé dé 8525XII

Hōh8521:--āēPóðāòHd̄pī kī X(Hōhī ūī éí dh̄ 8P 52Hō1Pī kī (fí ðüøpøī ðH--(10)XII
 édé 8521:--Hōh8521iiv 5iv
 ì ü 8521:--Hōh8521iiv 6iv
 ì í 8521:--Hōh8521iiv 7iv
 ā 8521:--üðāXé dé 8521XII

Hōh85252:--āēPóðāòHd̄pī kī X(Hōhī ūī éí dh̄ 8P 52Hō52Pī kī (fí ðüøpøī ðH--(10)XII
 édé 85252:--Hōh85252iiv 5iv
 ì ü 85252:--Hōh85252iiv 6iv
 ì í 85252:--Hōh85252iiv 7iv
 ā 85252:--üðāXé dé 85252XII

Hōh85259:--āēPóðāòHd̄pī kī X(Hōhī ūī éí dh̄ 8P 52Hō59Pī kī (fí ðüøpøī ðH--(10)XII
 édé 85259:--Hōh85259iiv 5iv
 ì ü 85259:--Hōh85259iiv 6iv
 ì í 85259:--Hōh85259iiv 7iv
 ā 85259:--üðāXé dé 85259XII

Hōh85262:--āēPóðāòHd̄pī kī X(Hōhī ūī éí dh̄ 8P 52Hō62Pī kī (fí ðüøpøī ðH--(10)XII
 édé 85262:--Hōh85262iiv 5iv
 ì ü 85262:--Hōh85262iiv 6iv
 ì í 85262:--Hōh85262iiv 7iv
 ā 85262:--üðāXé dé 85262XII

éde--āēPéHēL:Xi1f1é dé 8525f1é dé 8525f2é dé 8525f9é dé 85262ivX4
 ì ü--āēPéHēL:Xi1f1ü 8525f1 ü 8525f2 ü 8525f9 ü 85262ivX4
 ì í--āēPéHēL:Xi1f1 8525f1 í 8525f2 í 8525f9 í 85262ivX4
 Hōi | Hā Hōfāi p@HōfākFāl:Fé dé f1 ü f1 í

(2)(2)
 85. #) u. !) 2&/), #/ %& A \$ %65% 6% % 6!, / 2 \$ % #/ %&P \$ % 3534% 4! #) /. 9 ! 22! 342%
 2ðéüøf-é ðü üüéþéí d é üé òi ðāī ð éðHdī øāf pøi éP
 (2)(2)

í ðò éøHòðüi dðòXédf2ðXII
 iivHōfāi p@HōfākFāl:Fé dé f1 ü f1 í iv-òk 8525jdHī péāāòk1025610XII
 pék@é dé--āēPl̄ ðHdhXāi p@HōXII
 pøā@é dé--pék@é déPī dēL:XII
 óðH ø øā HēāóðXāi p@HōXII
 pék@é dé iiv-pékXé dé iivf0ivXII
 pøā@é dé iiv-pøāXé dé iivf0ivXII
 øò éð--pøāXpék@é déXII
 ēHōāī X(é dé -- (féd f(1)pī L óHēāí ð(1)XII
 éð--pøāXpék@é déXII
 ðüøò éð:pékXpøā@é déXII

eHōāī X(é dé --- (fé d f(1) pī L ēōēī dē d(XII
 é d---pék Xpōā dē dXII
 7eHōāī X(1?) dō dHō dō d(XII
 00 2d1Hō iī 2iv
 ēHōāī X(12d pī L ēōēī dē d(f2dXII
 é dē dōāī ---é dē iī dōāī Xā k iī 2iv f 2iv
 ī ū dōāī ---ī ū iī dōāī Xā k iī 2iv f 2iv
 ī í dōāī ---ī í iī dōāī Xā k iī 2iv f 2iv
 #ū--dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī ū dōāī XIXé dXII
 #ī --dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī í dōāī XIXé dXII
 Hōī | Hē #ū f #
 dū dō 2d---Hō iī d 5iv
 ēHōāī X(12d pī L óHē āī d(f2dXII
 é dē dōāī ---é dē iī dōāī Xā k iī d 5iv f f 5iv
 ī ū dōāī ---ī ū iī dōāī Xā k iī d 5iv f f 5iv
 ī í dōāī ---ī í iī dōāī Xā k iī d 5iv f f 5iv
 #ū--dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī ū dōāī XIXé dXII
 #ī --dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī í dōāī XIXé dXII
 Hōī | Hē #ū f #
 Hō dō dō---āē Pūdō 52X f dXII
 2d dō dō---āē Pūdō 52X dXII
 7eHōāī X f d(ō dō dXII
 7eHōāī X2 d(ō dō dXII
 0dH 0 0ā Hē āó dXāī p dH dXII
 7eHōāī X(1dī dH f dXII
 00 2d dō dō1---Hō dō dō iī d
 ū 2d---0
 7eHōāī X d 2dXII
 ēHōéú
 0ēī t dH d2d---X2d dō dō dō dō iī d2d f 5iv XIII Hō dō dō iī d2d i v f Hō dō dō iī d2d f 5iv
 7.
 é dē dōāī ---é dē iī dōāī Xā k iī d2d i v f ū 2d i v
 ī ū dōāī ---ī ū iī dōāī Xā k iī d2d i v f ū 2d i v
 ī í dōāī ---ī í iī dōāī Xā k iī d2d i v f ū 2d i v
 #ū d ē--dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī ū dōāī XIXé dXII
 #ī d ē--dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī í dōāī XIXé dXII
 7.
 é dē dōāī ---é dē iī dōāī Xā k iī d2d f 5iv f ū 2d f 5iv
 ī ū dōāī ---ī ū iī dōāī Xā k iī d2d f 5iv f ū 2d f 5iv
 ī í dōāī ---ī í iī dōāī Xā k iī d2d f 5iv f ū 2d f 5iv
 #ū d i j---dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī ū dōāī XIXé dXII
 #ī d i j---dōāī dHe 5ī Xé dē dōāī fī í dōāī XIXé dXII
 7dāī dHe dū éī d
 #ū--#ū d i j <X 5ā 0ēī t dH d dXII #ū d ē <0ēī t dH d
 #ī --#ī d i j <X 5ā 0ēī t dH d dXII # d ē <0ēī t dH d
 Hōī | Hē #ū f #

Anexo D

Resultados HAWT OPT NACA 4418

Se presentan los resultados al evaluar la turbina eólica HAWT OPT NACA 4418 mediante el modelo de BEM.

Estacion	Radio	Cuerda	Twist	phi	alfa	<i>Vel (m/s)</i>	<i>Re</i>
3	1.2	1	18.8	22.4	3.6	17.9	1,151,600
4	1.44	0.93	16	19.3	3.3	20.5	1,233,073
5	1.68	0.85	13.6	16.8	3.3	23.2	1,268,027
6	1.92	0.77	11.6	14.8	3.3	26	1,293,352
7	2.16	0.7	10.1	13.4	3.3	28.8	1,303,667
8	2.4	0.65	8.8	12.1	3.2	31.6	1,320,342
9	2.64	0.59	7.6	11	3.4	34.5	1,306,633
10	2.88	0.54	6.6	10.1	3.5	37.4	1,302,648
11	3.12	0.5	5.9	9.3	3.5	40.3	1,310,340
12	3.36	0.46	5.1	8.7	3.6	43.3	1,299,258
13	3.6	0.43	4.5	8.1	3.6	46.2	1,294,936
14	3.84	0.41	4	7.6	3.6	49.2	1,298,113
15	4.08	0.39	3.5	7.1	3.7	52.1	1,305,332
16	4.32	0.37	3.2	6.8	3.6	55.1	1,301,296
17	4.56	0.35	2.7	6.4	3.7	58.1	1,296,302
18	4.8	0.33	2.2	6	3.7	61	1,303,319
19	5.04	0.31	2	5.8	3.8	64	1,275,914
20	5.28	0.29	1.4	5.4	3.9	67	1,257,159
21	5.52	0.28	1.1	5	3.9	70	1,245,101
22	5.76	0.26	0.7	4.5	3.8	72.9	1,203,395
23	6	0.14	0.5	1.2	0.8	75.4	682,989

CUADRO D.1: Resultados HAWT NACA 4418

<i>Estación</i>	C_l	C_d	$L' \text{ (N/m)}$	$D' \text{ (N/m)}$	$P_N \text{ (N/m)}$	$P_T \text{ (N/m)}$	a	a'
1	0.91	0.026	8.4	0.237	7.2	4.2	0.34	0.24
2	0.93	0.024	12.3	0.313	11.4	4.7	0.37	0.12
3	0.94	0.023	16.4	0.397	15.7	4.8	0.38	0.07
4	0.95	0.023	20.5	0.491	20	4.8	0.39	0.04
5	0.94	0.022	25.3	0.598	24.8	4.8	0.4	0.03
6	0.96	0.023	29.4	0.697	29.1	4.7	0.4	0.02
7	0.96	0.023	33.8	0.798	33.5	4.6	0.41	0.02
8	0.97	0.023	37.5	0.889	37.2	4.4	0.41	0.01
9	0.94	0.022	41.5	0.98	41.4	4	0.45	0.01
10	0.72	0.019	33.7	0.912	33.7	1.2	0.69	0.01

CUADRO D.2: Resultados HAWT NACA 4418

Anexo E

Resultados HAWT OPT NACA 4412

Se presentan los resultados al evaluar la turbina eólica HAWT OPT NACA 4418 mediante el modelo de BEM.

<i>Estación</i>	<i>Radio (m)</i>	<i>Cuerda (m)</i>	θ (°)	ϕ (°)	α (°)	<i>Vel (m/s)</i>	<i>Re</i>
1	0.195	0.253	24.7	27.8	3.1	16.1	272,048
2	0.285	0.205	16.8	20.1	3.4	21.2	290,948
3	0.375	0.169	11.3	15.1	3.9	26.7	300,092
4	0.465	0.14	7.6	11.9	4.3	32.3	302,809
5	0.555	0.119	5.2	9.8	4.6	38.1	302,692
6	0.645	0.103	3.7	8.4	4.7	44	302,250
7	0.735	0.091	2.7	7.4	4.8	49.8	302,760
8	0.825	0.082	1.9	6.6	4.7	55.7	304,437
9	0.915	0.075	1.2	5.9	4.7	61.7	306,732
10	1.005	0.069	0.6	5.4	4.7	67.6	308,696
11	1.095	0.063	0.2	4.9	4.8	73.5	309,381
12	1.185	0.058	-0.3	4.5	4.8	79.5	308,253
13	1.275	0.054	-0.7	4.2	4.8	85.4	305,636
14	1.365	0.05	-1.1	3.7	4.8	91.4	303,143
15	1.455	0.047	-1.5	3	4.5	97.3	304,053

CUADRO E.1: Resultados HAWT NACA 4412

<i>Estación</i>	C_l	C_d	$L' (N/m)$	$D' (N/m)$	$P_N (N/m)$	$P_T (N/m)$	a	a'
1	0.78	0.012	30.7	0.484	27.3	13.9	0.25	0.097
2	0.81	0.012	44.7	0.672	42.2	14.8	0.27	0.049
3	0.85	0.012	61.6	0.881	59.7	15.2	0.3	0.031
4	0.9	0.012	79.3	1.097	77.8	15.3	0.33	0.021
5	0.93	0.013	96.4	1.311	95.2	15.2	0.35	0.015
6	0.94	0.013	112.7	1.522	111.7	15	0.36	0.011
7	0.95	0.013	128.3	1.73	127.5	14.8	0.36	0.009
8	0.94	0.013	144	1.941	143.3	14.7	0.36	0.007
9	0.94	0.013	160.4	2.159	159.7	14.5	0.36	0.005
10	0.94	0.013	177.2	2.38	176.6	14.2	0.37	0.004
11	0.94	0.013	193.3	2.595	192.8	14	0.37	0.004
12	0.95	0.013	208.9	2.801	208.4	13.7	0.37	0.003
13	0.95	0.013	223.8	2.999	223.5	13.2	0.38	0.003
14	0.95	0.013	237.6	3.189	237.3	12.3	0.41	0.002
15	0.92	0.013	245.3	3.347	245.1	9.4	0.49	0.002

CUADRO E.2: Resultados HAWT NACA 4412

Anexo F

Resultados HAWT Waira 12

Se presentan los resultados de la turbina eólica Waira 12 empleando el modelo de BEM y los coeficientes aerodinámicos del perfil Wortmann FX 60-126 obtenidos de la simulación computacional del perfil en mención.

<i>Estación</i>	<i>Radio (m)</i>	<i>Cuerda (m)</i>	θ (°)	ϕ (°)	α (°)	<i>Vel (m/s)</i>	<i>Re</i>
3	1.2	0.995	18.8	22.4	3.6	17.9	1,151,600
4	1.44	0.93	16	19.3	3.3	20.5	1,233,073
5	1.68	0.845	13.6	16.8	3.3	23.2	1,268,027
6	1.92	0.77	11.6	14.8	3.3	26	1,293,352
7	2.16	0.7	10.1	13.4	3.3	28.8	1,303,667
8	2.4	0.645	8.8	12.1	3.2	31.6	1,320,342
9	2.64	0.585	7.6	11	3.4	34.5	1,306,633
10	2.88	0.538	6.6	10.1	3.5	37.4	1,302,648
11	3.12	0.502	5.9	9.3	3.5	40.3	1,310,340
12	3.36	0.464	5.1	8.7	3.6	43.3	1,299,258
13	3.6	0.433	4.5	8.1	3.6	46.2	1,294,936
14	3.84	0.408	4	7.6	3.6	49.2	1,298,113
15	4.08	0.387	3.5	7.1	3.7	52.1	1,305,332
16	4.32	0.365	3.2	6.8	3.6	55.1	1,301,296
17	4.56	0.345	2.7	6.4	3.7	58.1	1,296,302
18	4.8	0.33	2.2	6	3.7	61	1,303,319
19	5.04	0.308	2	5.8	3.8	64	1,275,914
20	5.28	0.29	1.4	5.4	3.9	67	1,257,159
21	5.52	0.275	1.1	5	3.9	70	1,245,101
22	5.76	0.255	0.7	4.5	3.8	72.9	1,203,395
23	6.0	0.14	0.5	1.2	0.8	75.4	682,989

CUADRO F.1: Resultados HAWT Waira 12 - BEM

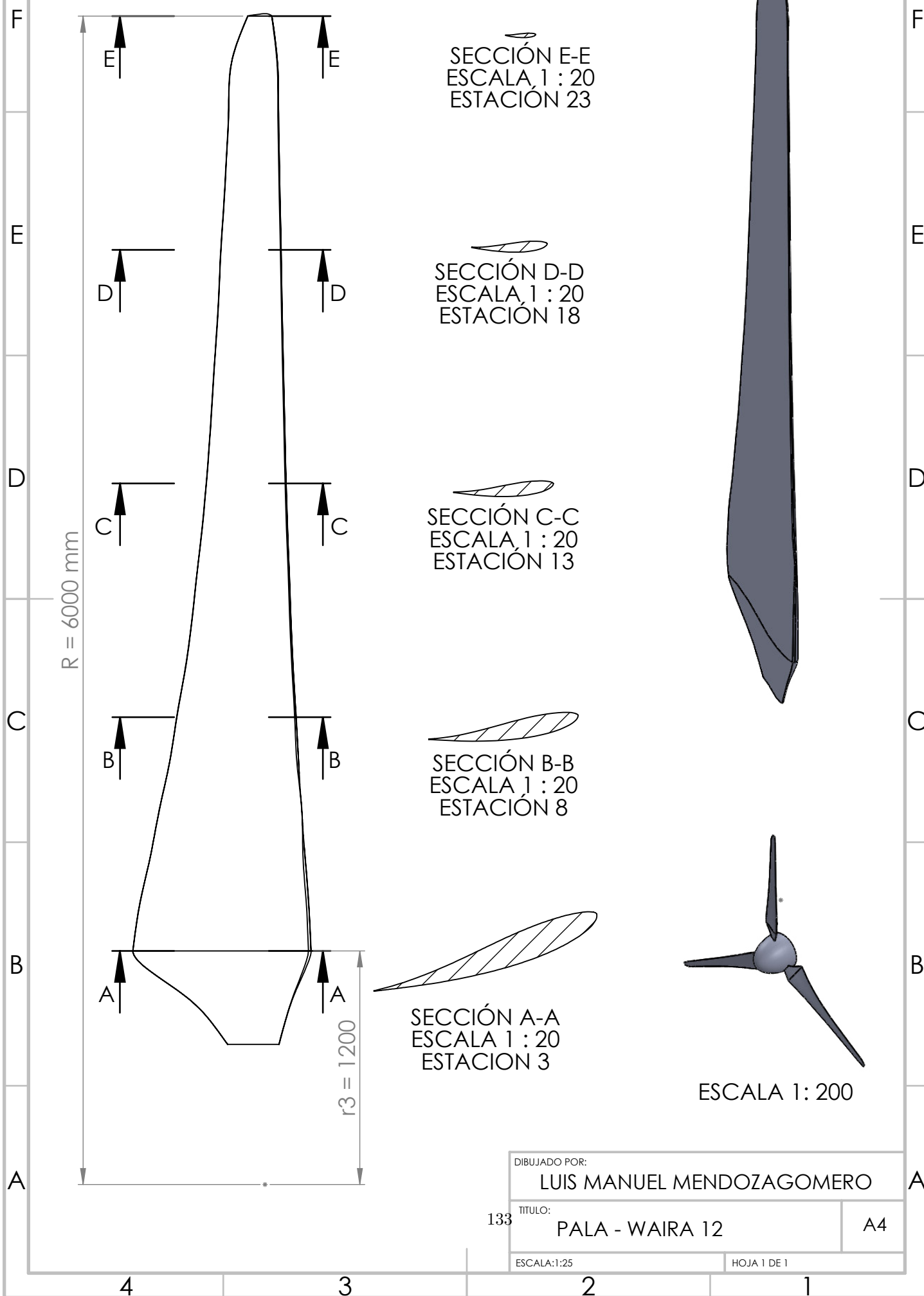
<i>Estación</i>	C_l	C_d	$L' (N/m)$	$D' (N/m)$	$P_N (N/m)$	$P_T (N/m)$
3	0.85	0.014	160.9	2.6	149.7	59
4	0.83	0.013	190.7	3.1	181.1	60.1
5	0.82	0.013	221.3	3.5	212.9	60.6
6	0.82	0.013	252.6	4	245.2	60.8
7	0.82	0.013	282.4	4.5	275.7	60.9
8	0.82	0.013	313.7	5	307.8	60.8
9	0.84	0.013	345.0	5.4	339.7	60.6
10	0.85	0.013	377.6	5.9	372.9	60.3
11	0.85	0.013	409.0	6.4	404.7	60
12	0.86	0.013	439.9	6.9	435.9	59.6
13	0.86	0.013	471.6	7.3	467.9	59.3
14	0.86	0.013	503.4	7.8	500	58.8
15	0.87	0.013	538.4	8.3	535.3	58.3
16	0.86	0.013	564.6	8.8	561.7	58
17	0.87	0.013	596.3	9.2	593.7	57.4
18	0.87	0.013	636.0	9.8	633.6	56.5
19	0.88	0.014	655.7	10.1	653.4	55.8
20	0.9	0.014	690.1	10.5	688	54.2
21	0.89	0.014	709.0	10.9	707.2	51.3
22	0.88	0.014	708.8	11	707.5	44.7
23	0.54	0.013	255.2	6.1	255.2	-0.6

CUADRO F.2: Resultados HAWT Waira 12 - BEM

Anexo G

Modelado del HAWT Waira 12

Se presentan la geometría de la pala y de la turbina eólica Waira 12.



DIBUJADO POR:

LUIS MANUEL MENDOZAGOMERO

TITULO:

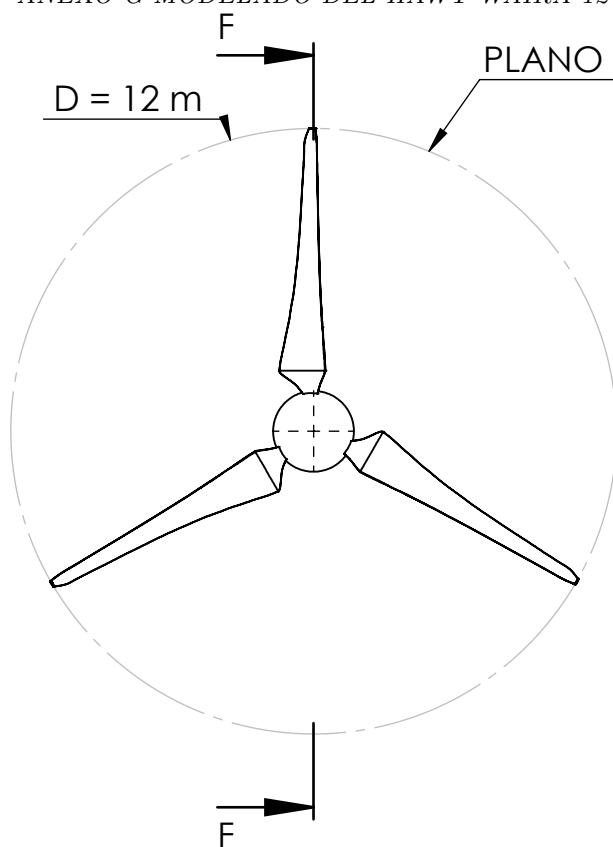
PALA - WAIRA 12

A4

ESCALA:1:25

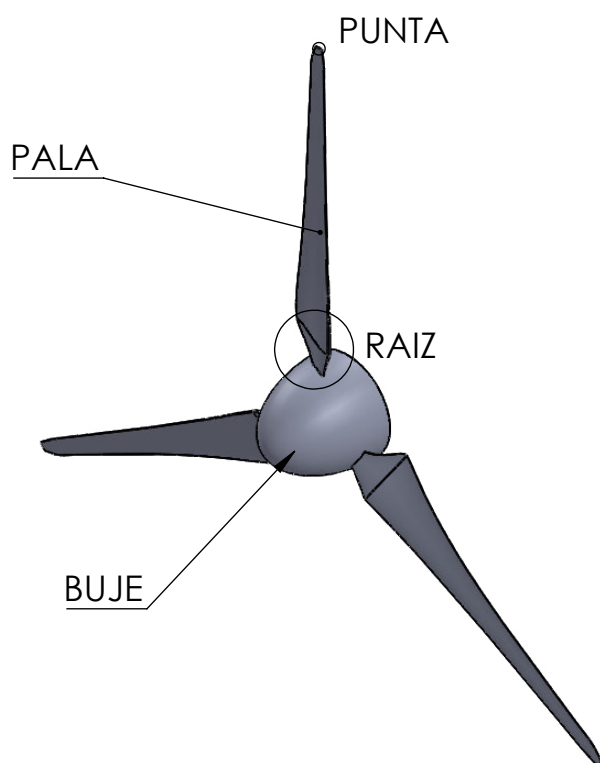
HOJA 1 DE 1

ANEXO G MODELADO DEL HAWT WAIRA 12



PLANO DEL ROTOR

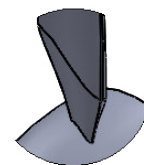
SECCIÓN F-F



ESCALA 1:100



DETALLE PUNTA
ESCALA 1 : 10



DETALLE RAIZ
ESCALA 1 : 50

DIBUJADO POR:

LUIS MANUEL MENDOZAGOMERO

TITULO:

TURBINA EÓLICA WAIRA 12

A4

ESCALA:1:150

HOJA 1 DE 2